

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΥΠΟΘΑΛΛΑΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΥΠΟ ΠΛΕΥΡΙΚΗ
ΕΛΑΦΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΛΟΓΩ
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΣ**

ΔΙΟΝΥΣΙΑ-ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΜΟΥΛΟΠΟΥΛΟΥ

Τριμελής Επιτροπή

Ιωάννης Τσομπανάκης, (Επιβλέπων) Π.Κ.

Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Π.Κ.

Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, Ε.Μ.Π.

Χανιά, 2017

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Υπολογιστική Προσομοίωση της απόκρισης υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων υπό πλευρική εδαφική μετατόπιση λόγω κατολισθήσεως», εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υπολογιστικής Δυναμικής & Ενέργειας (CODEN), στη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Τσομπανάκη.

Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν αναμφισβήτητα την κυριότερη πηγή ενέργειας του 21^{ου} αιώνα. Πιο συγκεκριμένα, ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καλύπτουν περισσότερο από τα τρία τέταρτα των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Η κάλυψη αυτών των αναγκών έχει ως φυσικό επακόλουθο τη συνεχή εξέλιξη των μέσων μεταφοράς των υδρογονανθράκων μεταξύ διαφορετικών χωρών ή ακόμα και ηπείρων. Η παρούσα διερεύνηση επικεντρώνεται στο συνηθέστερο τρόπο μεταφοράς υδρογονανθράκων, τους υποθαλάσσιους αγωγούς. Ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου, είναι η καταπόνηση εξαιτίας κάποιας ισχυρής υποθαλάσσιας κατολίσθησης κάθετα στον άξονα τους. Η ανάγκη αντιμετώπισης του κινδύνου αυτού οδήγησε στην ανάπτυξη διεθνών και εθνικών κανονισμών κατά τις τελευταίες δεκαετίες για τον ασφαλή σχεδιασμό υποθαλάσσιων αγωγών, όπως για παράδειγμα ο νορβηγικός κανονισμός της DNV.

Προφανώς, η πιο συντηρητική μέθοδος για την αποφυγή της καταπόνησης λόγω έντονων σεισμικών εδαφικών μετακινήσεων είναι η παράκαμψη των κρίσιμων περιοχών. Παρόλα αυτά, η επιλογή αυτή δεν είναι πάντοτε δυνατή και βέβαια συνήθως είναι τεchnο-οικονομικά ασύμφορη, οπότε άλλες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η αγκύρωση του αγωγού, η χρήση καλύτερου υλικού, κ.α.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό υπολογιστικό εργαλείο για την προσομοίωση αγωγών που υπόκεινται σε καταπόνηση λόγω μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, καθώς και για τη διερεύνηση πιθανών εναλλακτικών λύσεων για την αποφυγή της αστοχίας τους όταν η παράκαμψη μιας κρίσιμης περιοχής δεν είναι δυνατή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για την αριθμητική ανάλυση του αγωγού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Σε όλες τις περιπτώσεις το κάθε προσομοίωμα διαιρείται σε τρία μέρη ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης και την εγγύτητα ως προς τη ζώνη κατολίσθησης. Το κάθε τμήμα προσομοιώνεται με διαφορετική πυκνότητα

πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή διαφορετικό μέγεθος στοιχείων. Ο αγωγός στη συγκεκριμένη μελέτη προσομοιώθηκε με μέλη αγωγού, και η αλληλεπίδραση του με τον πυθμένα προσομοιώθηκε με ειδικά στοιχεία αλληλεπίδρασης τα οποία διαθέτει η βιβλιοθήκη του λογισμικού ABAQUS.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται γενικές πληροφορίες σχετικά με τους υποθαλάσσιους αγωγούς υδρογονανθράκων, ορίζονται και αναλύονται έννοιες όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, τα συστήματα μεταφοράς υδρογονανθράκων και οι γεωκίνδυνοι και γίνεται περιγραφή των μεθόδων τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών. Ακόμη, παρουσιάζονται άλλοι σημαντικοί κίνδυνοι με τους οποίους μπορεί να έρθει αντιμέτωπος ένας υποθαλάσσιος αγωγός υδρογονανθράκων

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται εκτενής αναφορά στις κανονιστικές οδηγίες για τον σχεδιασμό των υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων σύμφωνα με τον νορβηγικό κανονισμό DetNorskeVeritas (DNV). Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν σχετικά με την αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού, με την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής του αγωγού και με την τοποθέτηση των αγωγών. Επίσης, γίνεται ταξινόμηση των βλαβών που μπορούν να αντέξουν οι αγωγοί, καθώς και των συνεπειών των ενδεχόμενων αστοχιών ως προς την ανθρώπινη ασφάλεια, τις επιπτώσεις στο περιβάλλον καθώς και τις οικονομικές απώλειες. Ακόμη, γίνεται αναφορά στην εκτίμηση των γεωκινδύνων και στους παράγοντες που την καθορίζουν.

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις μηχανικές ιδιότητες των υποθαλασσιών αγωγών. Αναλυτικότερα, δίνονται πληροφορίες σχετικά με το υλικό κατασκευής, με τις διαστάσεις της διατομής, με τις στατικές και δυναμικές φορτίσεις που δέχονται οι υποθαλάσσιοι αγωγοί και παρατίθενται οι βασικές σχέσεις σχεδιασμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο κίνδυνος αστοχίας υποθαλάσσιου αγωγού λόγω κατολισθήσεως. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται ορισμός της έννοιας της κατολίσθησης και περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και την επίδραση τους στους υποθαλάσσιους αγωγούς, γίνεται παρουσίαση των βασικών μεγεθών της

κατολίσθησης και του τρόπου υπολογισμού τους μέσω κατάλληλων αναλυτικών σχέσεων που έχουν παρουσιαστεί σε πρόσφατες εργασίες (Yuang et al., 2014).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της αριθμητικής προσομοίωσης του εξεταζόμενου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο υπό μελέτη αγωγός έχει μήκος 3000m και θεωρείται τοποθετημένος σε βάθος περίπου 200m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το πρόβλημα μελετάται για αρκετές περιπτώσεις, τόσο για αγωγό φυσικού αερίου σε ποικίλες συνθήκες κατολίσθησης, όσο και πετρελαίου υπό παρόμοιες συνθήκες κατολίσθησης.

Στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξήχθησαν. Πιο αναλυτικά, αρχικά γίνεται επαλήθευση της αναλυτικής μεθοδολογίας πάνω στην οποία βασίστηκε η παρούσα αριθμητική διερεύνηση και στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των αγωγών υδρογονανθράκων που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω εποπτικών διαγραμμάτων μετακινήσεων και παραμορφώσεων και συνοδεύονται από εκτενή σχολιασμό.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πολυπαραμετρική ανάλυση των περιπτώσεων που εξετάστηκαν και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Τσομπανάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε, την έμπνευση για έρευνα που μου έδωσε και γενικά για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Διονύση Χατζηδάκη για την πολύτιμη βοήθεια, τις γνώσεις και τις συμβουλές που μου προσέφερε.

Ευχαριστώ τους φίλους μου Κατερίνα Μετζεσέμη και Μίλτο Κωνσταντινόπουλο για τη συνολική τους στήριξη όλα τα χρόνια των σπουδών μου και όλους όσοι συνέβαλαν τόσο ψυχολογικά όσο και υλικά για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής. Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στην οικογένεια μου για την υποστήριξη της όλα αυτά τα χρόνια.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη και τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Ευχαριστίες.....	v
Περιεχόμενα.....	vii
Περίληψη.....	xi
Abstract.....	xiii
1.Γενικά Χαρακτηριστικά Υποθαλάσσιων Αγωγών Υδρογονανθράκων...	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ορισμοί.....	2
1.2.1 Συστήματα μεταφοράς με αγωγούς	3
1.2.2 Πετρέλαιο	3
1.2.3 Φυσικό Αέριο	4
1.2.4 Γεωκίνδυνοι	5
1.2.5 Άλλοι Κίνδυνοι.....	7
1.3 Υποθαλάσσιοι αγωγοί	10
1.4 Τοποθέτηση Υποθαλάσσιων Αγωγών	12
1.4.1 Μέθοδος S-lay	12
1.4.2 Μέθοδος J-lay	13
1.4.3 Μέθοδος Reel-lay	14
1.4.4 Tow Μέθοδος	15
2. Κανονιστικές Οδηγίες Υποθαλάσσιων Αγωγών.....	17
2.1 Αλληλεπίδραση Εδάφους – Αγωγού	18
2.1.1 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού	19
2.1.2 Αντίσταση Εδάφους	20
2.2 Άνωση Αγωγού	22

2.3 Χάραξη Αγωγού.....	23
2.4 Απαιτήσεις για την τοποθέτηση υποθαλάσσιων αγωγών.....	24
2.5 Ταξινόμηση Βλαβών.....	25
2.6 Συνέπειες Αστοχιών.....	26
2.6.1 Ανθρώπινη Ασφάλεια.....	26
2.6.2 Επιπτώσεις στο Περιβάλλον.....	28
2.6.3 Οικονομικές Απώλειες.....	29
2.7 Εκτίμηση κινδύνου	30
3. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Υποθαλάσσιων Αγωγών	33
3.1 Υλικό κατασκευής	33
3.2 Διαστάσεις διατομής	34
3.3 Στατικές φορτίσεις	35
3.3.1 Σχεδιασμός αντοχής έναντι εσωτερικής πίεσης.....	35
3.3.2 Υπολογισμός αντοχής έναντι εξωτερικής πίεσης.....	40
3.4 Δυναμικές Φορτίσεις.....	42
3.4.1 Υδροδυναμική Φορτίση.....	42
4. Κίνδυνος αστοχίας αγωγού λόγω κατολισθήσεως.....	45
4.1 Ορισμός	45
4.2 Χαρακτηριστικά Κατολισθήσεων.....	46
4.3 Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις.....	47
4.4 Επίδραση κατολισθήσεων σε υποθαλάσσιο αγωγό	49
4.5 Βασικά Μεγέθη Κατολισθήσεων και Αναλυτικός Τρόπος Υπολογισμού τους	50
4.5.1 Βασικές εξισώσεις υποβρύχιας κατολίσθησης.....	50
4.5.2 Λύση των εξισώσεων.....	51
5. Αριθμητική Προσομοίωση Υποθαλάσσιου Αγωγού υπό Κατολίσθηση.....	55
5.1 Περιγραφή του προβλήματος	55
5.2 Περιγραφή Υπολογιστικού Προσομοιώματος	60
5.2.1 Διακριτοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων.....	62

5.2.2 Στοιχεία Προσομοίωσης Αγωγού.....	63
6.Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων.....	69
6.1Επαλήθευση υπολογιστικού προσομοιώματος.....	70
6.2Παραμετρική ανάλυση αγωγού φυσικού αερίου υπό κατολίσθηση κάθετα στον άξονα του αγωγού.....	73
6.2.1 Δύναμη Κατολίσθησής.....	74
6.2.2 Πλάτος Κατολίσθησης	76
6.2.3 Διατομή αγωγού.....	78
6.2.4 Εσωτερική Πίεση	79
6.2.5 Γωνία κλίσης Πυθμένα.....	81
6.2.6 Υλικό Αγωγού	82
6.3 Παραμετρική ανάλυση αγωγού φυσικού αερίου για κατολίσθηση υπό γωνία	84
6.4 Παραμετρική ανάλυση αγωγού πετρελαίου	89
7. Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	95
7.1 Γενικά συμπεράσματα.....	95
7.2 Συμπεράσματα από την Αριθμητική Διερεύνηση.....	97
7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	100
Βιβλιογραφία	101
Ελληνική Βιβλιογραφία	101
Διεθνής Βιβλιογραφία	101
Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία	103

Στις μέρες μας η εξόρυξη αποθεμάτων υδρογονανθράκων, από μεγάλα βάθη θαλασσών, σε συνδυασμό με την ανάγκη για μεταφορά των υδρογονανθράκων σε μεγάλες αποστάσεις, έχει καταστήσει τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των υποθαλάσσιων αγωγών ιδιαίτερα σημαντική. Δεδομένου ότι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί εκτείνονται σε μεγάλα μήκη, είναι πολύ πιθανόν να αντιμετωπίσουν διάφορους γεωκινδύνους οι οποίοι προκαλούν σημαντικές μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις και είναι πιθανόν να απειλήσουν την ακεραιότητά τους.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική μελέτη της απόκρισης υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων όταν αυτοί υπόκεινται σε υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο προσομοιώνεται η επίδραση της υποθαλάσσιας κατολίσθησης στον αγωγό και εξετάζεται η καταπόνηση του υπό πλευρικές εδαφικές μετατοπίσεις κάθετα ή υπό γωνία στον άξονα του, οι οποίες προκαλούνται εξαιτίας μίας κατολίσθησης. Μελετούνται διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το πρόβλημα, όπως διαφορετικό περιεχόμενο αγωγού (φυσικό αέριο ή πετρέλαιο), διαφορετικές συνθήκες κατολίσθησεως, διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και του πυθμένα, κ.α.

Αρχικά γίνεται μια εκτενής περιγραφή του εξεταζόμενου προβλήματος, παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για τους υποθαλάσσιους αγωγούς και τις σχετικές κανονιστικές οδηγίες, σύμφωνα με το νορβηγικό κανονισμό DNV. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά των υποθαλάσσιων αγωγών και αναλύεται εκτενέστερα το πρόβλημα της υποθαλάσσιας κατολίσθησης. Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση, έγινε επιλογή και επαλήθευση της αναλυτικής μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη, μέσω της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες των αναλυτικών σχέσεων. Ακολούθως, εξετάζονται μία σειρά από κρίσιμες παραμέτρους και παρουσιάζεται η επίδραση τους στην καταπόνηση του αγωγού. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος της τρωτότητας

ενός υποθαλάσσιου αγωγού σε κατολίσθηση και να προταθούν μέτρα αντιμετώπισης, και διατυπώνονται προτάσεις για περεταίρω διερεύνηση του προβλήματος.

Abstract

Nowadays, the exploitation of hydrocarbon reservoirs in high depths, in combination with the need of transportation of hydrocarbons in long distances, has made the design, construction and functioning of offshore pipelines very important. Given the fact that offshore pipelines are crossing extended areas, there is a strong possibility to face a variety of geohazards that cause substantial permanent ground deformations, thus, threatening the structural integrity of the pipelines.

The aim of this study is to examine numerically the response of offshore hydrocarbon pipelines when they are exposed to sea-bed landslide, under various orientations along their axis. For this purpose, numerical models (utilizing an efficient finite element software) have been developed, in order to study the effect of a subsea landslide on pipelines, i.e., the resulting distress of offshore pipelines subjected to lateral ground displacements. Various parameters affecting the examined problem have been investigated, such as pipeline content (natural gas or oil), landslide conditions, geometrical characteristics of the pipeline, etc.

Firstly, an extended introduction on the subject is provided, by presenting some general aspects of offshore pipelines and relevant design guidelines according to the Norwegian norm of DNV. Subsequently, some general technical features of offshore pipelines are provided and the hazard of subsea landslides is further analyzed. After a literature review on relevant studies, a validation is performed by comparing the obtained numerical results with those of a relevant analytical methodology. Having validated the developed numerical models, a wide range of critical parameters is examined and their impact on the pipeline is presented. Finally, the results of the study are summarized, in order to assess the vulnerability of offshore pipelines due to landslides and to propose potential mitigation measures as well as to propose suggestions for further studies on this important subject.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Γενικά Χαρακτηριστικά Υποθαλάσσιων Αγωγών Υδρογονανθράκων

1.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η χρήση μεγάλων αγωγών για τη μεταφορά υδρογονανθράκων έχει αυξηθεί σημαντικά. Σήμερα, η ανάγκη για τη μεταφορά υδρογονανθράκων, καθώς και η εκμετάλλευση των αποθεμάτων υδρογονανθράκων σε μεγάλα θαλάσσια βάθη, έχουν καταστήσει αναγκαία τη χρήση υποθαλάσσιων αγωγών. Συνεπώς, όλο και περισσότερα έργα υποθαλάσσιων αγωγών αναμένεται να κατασκευαστούν στο εγγύς μέλλον, με κάποια να έχουν ήδη ανακοινωθεί ότι βρίσκονται στη διαδικασία του σχεδιασμού ή της κατασκευής.

Η λέξη ‘αγωγός’ προέρχεται από το ρήμα ‘άγω’ που στα αρχαία ελληνικά σημαίνει μεταφέρω και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνταν για να δηλώσει την καθοδηγούμενη μετακίνηση μιας αγέλης ζώων. Οι πρώτες καταγεγραμμένες προσπάθειες κατασκευής αγωγού πραγματοποιήθηκαν στην Κίνα, γύρω στο 5.000 π.Χ. και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν μπαμπού. Επίσης, οι αρχαίοι πολιτισμοί της Αιγύπτου, της Μεσοποταμίας και της Ρώμης χρησιμοποιούσαν ευρέως αγωγούς από πηλό ή πέτρα. Υπάρχει μια μαρτυρία για την κατασκευή ενός αγωγού μεγάλου μήκους, από δέρματα βοδιού στην έρημο της Αιγύπτου για την υδροδότηση των περσικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια εισβολής του βασιλιά της Περσίας Καμβύση Β’ το 525 π.Χ. (Lawal, 2010).

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί διασχίζοντας εκτεταμένες περιοχές, ενδέχεται να αντιμετωπίσουν μια ποικιλία γεωκινδύνων (geohazards) που μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους (Permanent Ground Deformations - PGDs) επηρεάζοντας τον αγωγό και ενδεχομένως απειλώντας την ακεραιότητα του. Σε περίπτωση που ο αγωγός θα διασχίσει μια περιοχή γεωκινδύνων, υπάρχουν τρεις επιλογές για να προχωρήσει ο σχεδιασμός του. Η πρώτη επιλογή είναι να αποφευχθεί η προβληματική

περιοχή μέσω επαναχάραξης της διαδρομής, η οποία συνήθως θεωρείται ως δυσμενής λύση λόγω του υψηλού κόστους της και της μεγάλης απώλειας χρόνου, που είναι εξαιρετικά σημαντικοί παράγοντες για τέτοιου είδους έργα. Η δεύτερη είναι η εφαρμογή (αν είναι δυνατόν) μέτρων μετριασμού / προστασίας, προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των γεωκινδύνων, μια επιλογή που είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε μεγάλα βάθη. Τέλος, η τρίτη επιλογή είναι να επιτραπεί το πέρασμα του αγωγού μέσα από την επικίνδυνη περιοχή, υπό την προϋπόθεση ότι ο αγωγός θα έχει ελεγχθεί ότι επαρκεί για τις δεδομένες συνθήκες επικινδυνότητας.

Σε περιοχές με μέτρια ή υψηλή σεισμικότητα ο σχεδιασμός ενός υποθαλάσσιου αγωγού είναι πιο απαιτητικός, λόγω των γεω-κινδύνων που σχετίζονται με τους σεισμούς, όπως κατολισθήσεις, φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους, και ενεργά ρήγματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι αν και σε όλο τον κόσμο υπάρχει μια μεγάλη εμπειρία στην υπεράκτια γεωτεχνική μηχανική και τον σχεδιασμό ενός αγωγού, η εμπειρία στον αντισεισμικό σχεδιασμό των υπεράκτιων αγωγών είναι μάλλον περιορισμένη, καθώς η πλειονότητα των αγωγών έχουν κατασκευαστεί σε μη-σεισμικές περιοχές (π.χ., Βόρεια Θάλασσα, Δυτική Αυστραλία, στον Κόλπο του Μεξικού, κ.α.). Έτσι, ο αντισεισμικός σχεδιασμός των υπεράκτιων αγωγών έναντι ενεργών ρηγμάτων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και περαιτέρω έρευνα.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων, οι οποίοι αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι περίπλοκα έργα μεγάλου μεγέθους και κόστους. Ένας επιπλέον λόγος που καθιστά αυτά τα έργα πιο σύνθετα, είναι η πιθανότητα να εμπλέκονται σε διεθνείς γεωπολιτικές διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιες επιπλοκές προκύπτουν από πολιτικές εντάσεις, μεταξύ των χωρών κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού. Κατά συνέπεια, τέτοια έργα απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό και διαπραγματεύσεις με πολλούς φορείς.

1.2 Ορισμοί

Στη βιομηχανία των υποθαλασσίων αγωγών συχνά, η ορολογία δεν είναι σαφής και πολλές φορές οδηγεί σε σύγχυση. Γι' αυτόν τον λόγο, κρίνεται αναγκαίο να παρατεθούν οι παρακάτω ορισμοί που αφορούν τους αγωγούς και τους ενεργειακούς πόρους που αυτοί μεταφέρουν.

1.2.1 Συστήματα μεταφοράς με αγωγούς

Σύστημα μεταφοράς με αγωγούς (pipeline transport system), ονομάζεται το σύστημα μεταφοράς αγαθών (ή και μορφών ενέργειας) με τη χρήση αγωγών. Σύμφωνα με το Κέντρο Ελληνικής Γλώσσας ως αγωγός ορίζεται η επιμήκης κατασκευή, συνήθως σωλήνας, μέσα στην οποία διοχετεύεται κάτι, συνήθως υγρό ή αέριο, για να μεταφερθεί κάπου αλλού (αγωγός νερού, πετρελαίου, όμβριων υδάτων, φυσικού αερίου, κλπ).

1.2.2 Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο και ο ισοδύναμος του όρος αργό πετρέλαιο, καλύπτουν μια ευρύτατη ποικιλία μιγμάτων που αποτελούνται από ενώσεις αερίων, υγρών και στερεών υδρογονανθράκων, ποσότητες, θείου, αζώτου και οξυγόνου και συχνά περιέχουν ιχνοστοιχεία μετάλλων όπως βανάδιο και νικέλιο. Είναι ένα πολύπλοκο μίγμα συστατικών, με τη σύσταση του να διαφοροποιείται έντονα ανάλογα με την ηλικία και την προέλευση του. Τα προϊόντα του πετρελαίου παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος χρήσεων. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται ως καύσιμα για θέρμανση, ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία πετροχημικών, ως λιπαντικά και δομικά υλικά, κ.ά. Η άσφαλτος, που μένει ως υπόλειμμα των διεργασιών διύλισης, χρησιμοποιείται στην οδοποιία, σε μονωτικά υλικά, κ.ά. Τα προϊόντα που παράγονται από το πετρέλαιο και τα παράγωγά του, αντιστοιχούν περίπου στο 1/3 της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως (Kirk, 2004).



Σχήμα 1.1: Αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου στην Ευρώπη και στη βορειοδυτική Ασία το 2007(<http://www.allrussias.com>).

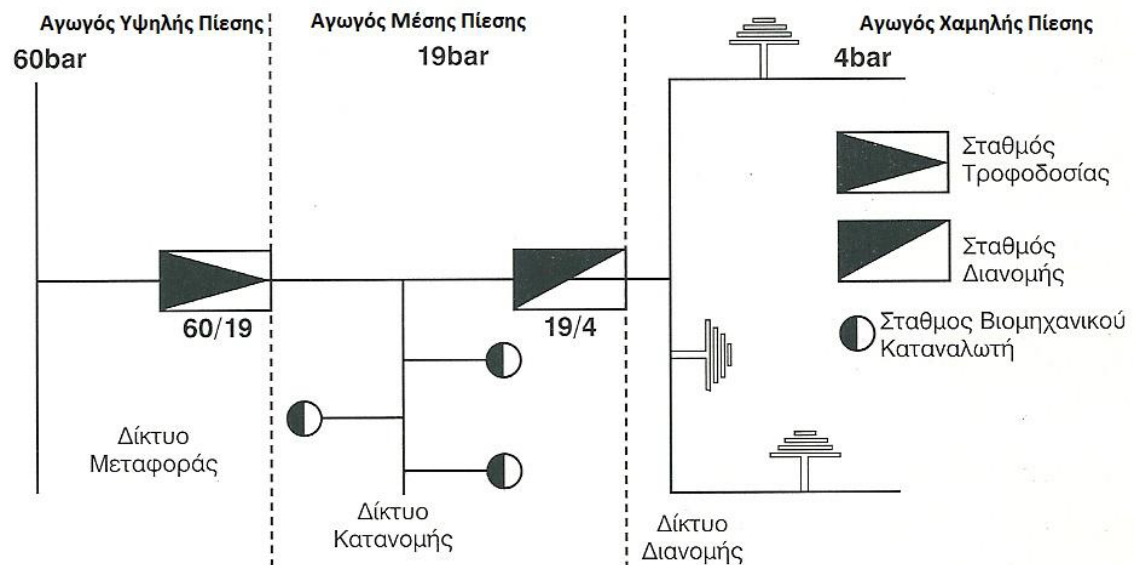
Έχει αποδειχτεί ότι οι αγωγοί αποτελούν τα πιο αξιόπιστα και οικονομικά μέσα για τη μεταφορά πετρελαίου και των προϊόντων του. Ο πρώτος αγωγός μεταφοράς αργού πετρελαίου κατασκευάστηκε από ξύλο, στην Πενσυλβανία των Η.Π.Α το 1865 από τον S. Karns για να αντικαταστήσει το υψηλό κόστος μεταφοράς που εισπράττονταν από τις μεταφορικές εταιρίες της εποχής, οι οποίες μετέφεραν βαρέλια με πετρέλαιο των 159 λίτρων έκαστο πάνω σε ιππήλατες άμαξες σε μια διαδρομή πέντε μιλίων για τρία δολάρια ανά βαρέλι. Το 1865 κατασκευάστηκε ένα δίκτυο αγωγών που αντικατέστησε τις ιππήλατες είχε μειωμένο κόστος, ίσο με ένα δολάριο ανά βαρέλι. Στο σχήμα 1.1 φαίνονται τα δίκτυα μεταφοράς πετρελαίου στην Ευρώπη και στις γειτονικές χώρες.

1.2.3 Φυσικό Αέριο

Το φυσικό αέριο είναι μίγμα υδρογονανθράκων και αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και σε πολύ μικρότερη αναλογία από αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και πεντάνιο. Καθοριστικός παράγοντας για τη σύστασή του, αποτελεί η προέλευσή του και ιδιαίτερα εάν πρόκειται για αμιγώς κοιτάσμα φυσικού αερίου ή προκύπτει από κοιτάσματα πετρελαίου. Η εμπορική αξιοποίησή του ξεκίνησε περίπου το 1810 ως καύσιμο σε λάμπες φωτισμού ενώ μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου κατασκευάστηκαν τα πρώτα δίκτυα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Στα προτερήματά του ως πηγή ενέργειας περιλαμβάνονται η δυνατότητα μεταφοράς του σε μεγάλες αποστάσεις μέσω αγωγών και βεβαίως η συγκριτικά, με άλλες πηγές ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον καύση του.

Η μεταφορά του φυσικού αερίου εξαρτάται από την κατάστασή του. Σε αέρια κατάσταση μεταφέρεται με αγωγούς υπό υψηλή πίεση, ενώ σε υγρή κατάσταση μεταφέρεται μέσα σε δεξαμενές με ειδικά πλοία. Οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου διακρίνονται ανάλογα με την πίεση σε αγωγούς μεταφοράς υψηλής πίεσης (40 – 100 bar), αγωγούς μεταφοράς μέσης πίεσης (~ 20 bar) και αγωγούς διανομής χαμηλής πίεσης (4 – 7 bar).

Οι αγωγοί υψηλής και μέσης πίεσης μεταφέρουν οικονομικά μεγάλους όγκους αερίου, προσφέρουν ισορροπία στο σύστημα μεταφοράς και παρέχουν σχετική ελαστικότητα στο σύστημα μεταφοράς καθώς χρησιμεύουν ως προσωρινοί χώροι αποθήκευσης του φυσικού αερίου. Οι αγωγοί διανομής, χαμηλής πίεσης, χρησιμοποιούνται για την προμήθεια αερίου στις πόλεις επειδή προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια, έχουν χαμηλότερο κόστος και η τελική χρήση αερίου γίνεται υπό ατμοσφαιρική πίεση. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι διατάξεις των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου ανάλογα με το μέγεθος των πιέσεων.



Σχήμα 1.2: Σχηματική διάταξη του συστήματος αγωγών φυσικού αερίου (Καραπάνος, 2000).

Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου

Η Ελλάδα σήμερα προμηθεύεται φυσικό αέριο από τη Ρωσία (μέσω Βουλγαρίας) μέσω αγωγών σε αέρια μορφή, από την Αλγερία με δεξαμενόπλοια σε υγροποιημένη μορφή (στις εγκαταστάσεις της νήσου Ρεβυθούσας, στον κόλπο των Μεγάρων) και από το 2007, από το Αζερμπαϊτζάν (μέσω Τουρκίας) μέσω αγωγών σε αέρια μορφή. Το φυσικό αέριο εισάγεται στην Ελλάδα μέσω αγωγών υψηλής πίεσης, που διαχειρίζεται ο Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ). Η διάθεση του γίνεται μέσα από δίκτυα μέσης πίεσης, χαλύβδινους σωλήνες με ονομαστική πίεση λειτουργίας 19 bar, στους οποίους συνδέονται μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές καθώς και με σταθμούς διανομής που τροφοδοτούν τα δίκτυα χαμηλής πίεσης για τους αστικούς καταναλωτές όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

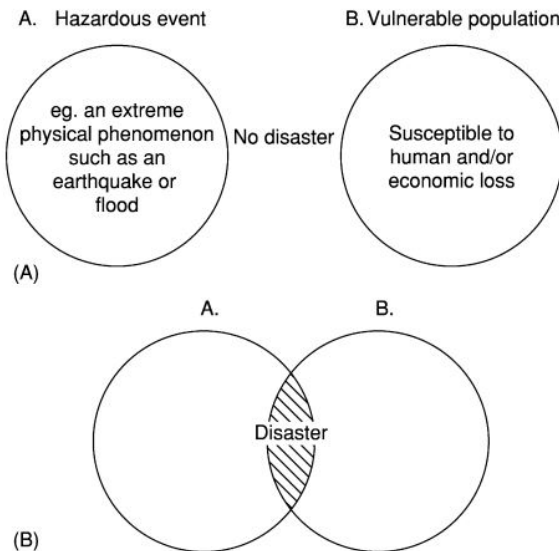
1.2.4 Γεωκίνδυνοι

Υπάρχουν δύο ορισμοί των γεωκινδύνων:

- ✓ Γεωκίνδυνος ονομάζεται ένας κίνδυνος γεωλογικού, υδρολογικού χαρακτήρα, που συνιστά απειλή για τον άνθρωπο και τις δραστηριότητές του (Mc Call and Marker 1989).
- ✓ Γεωκίνδυνος είναι ο κίνδυνος που περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με κάθε φυσική διαδικασία που συμβαίνει στον πλανήτη (Mc Call et al., 1992).

Ο δεύτερος ορισμός είναι ευρύτερος, αλλά ο πρώτος εστιάζει στο ουσιαστικό στοιχείο της έκθεσης του πληθυσμού στον συγκεκριμένο κίνδυνο, το οποίο και εκφράζεται από τον

Degg (1989) στο διάγραμμα του για την εξίσωση αστοχίας (Σχήμα 1.3) που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του κινδύνου, της αστοχίας και της τρωτότητας. Όσο μεγαλύτερη και πιο σοβαρή είναι η περίπτωση και όσο πιο ευάλωτος είναι ο πληθυσμός, τόσο μεγαλύτερη είναι η καταστροφή. Το όριο κάτω από το οποίο η μεθοδολογία θεωρεί ως μηδενική καταστροφή, είναι να μην υπάρχει παρουσία ανθρώπων.

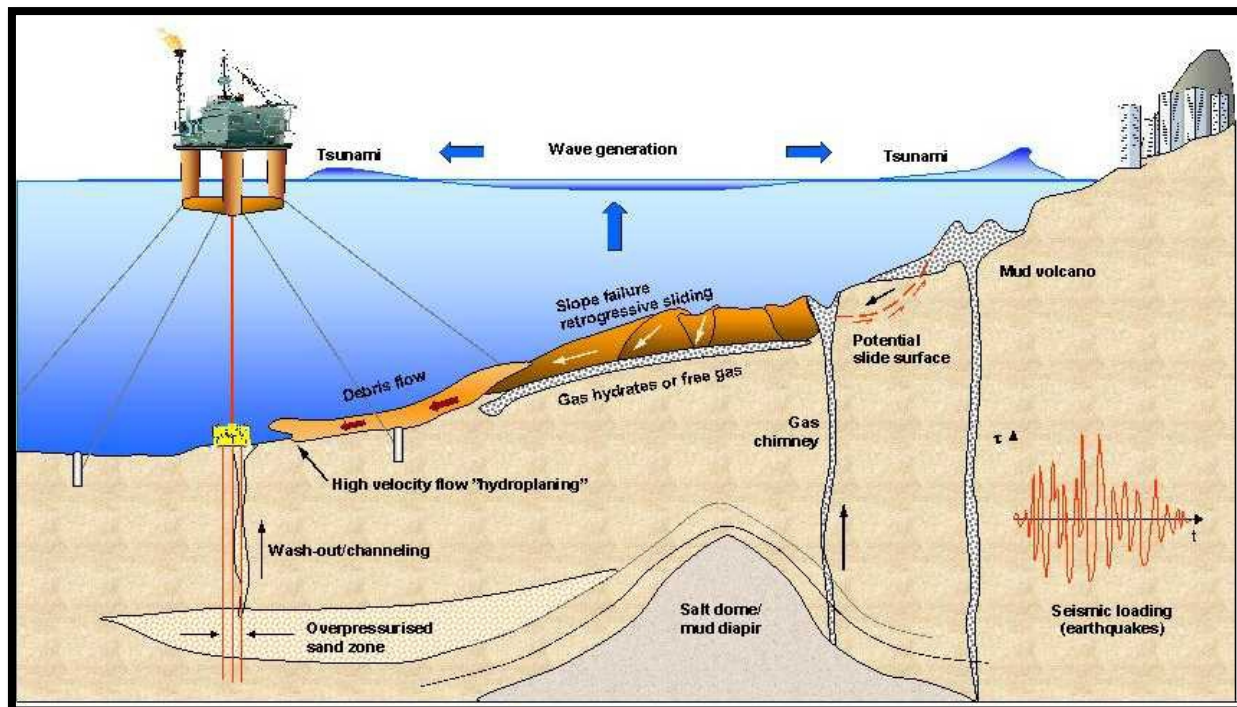


Σχήμα 1.3: Διάγραμμα αστοχίας (Degg, 1989).

Οι λέξεις επικινδυνότητα (hazard) και διακινδύνευση (risk) συχνά χρησιμοποιούνται χωρίς διάκριση. Η διακινδύνευση (risk) όμως, είναι ένας ποσοτικός προσδιορισμός. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί προϊόν του κινδύνου και της τρωτότητας (vulnerability). Οι γεωκίνδυνοι μπορεί να αποτελέσουν απειλή για την ακεραιότητα ή την λειτουργικότητα ενός αγωγού και να επηρεάσουν το διάστημα λειτουργίας του. Μπορούν να προσδιοριστούν από μια μελέτη γεωλογίας, γεωμορφολογίας και γεωγραφίας της περιοχής, καθώς και μέσω γεωφυσικών και γεωτεχνικών μελετών και ερευνών. Το Σχήμα 1.4 παρουσιάζει μια απεικόνιση των τυπικών γεωκινδύνων που πρέπει να εξεταστούν από τον γεωτεχνικό μηχανικό κατά τη μελέτη υποθαλάσσιων αγωγών.

Οι αγωγοί μπορεί να καταστραφούν είτε από μόνιμες μετακινήσεις του εδάφους (PGD) ή από παροδικές μετακινήσεις λόγω διάδοσης σεισμικών κυμάτων. Οι μόνιμες κινήσεις του εδάφους περιλαμβάνουν επιφανειακά προβλήματα, όπως θραύσεις ρηγμάτων, φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους και κατολισθήσεις. Παρά το γεγονός ότι οι κίνδυνοι PGD υπάρχουν σε μικρές περιοχές μέσα στο δίκτυο αγωγών, είναι ικανοί να επιβάλουν μεγάλες παραμορφώσεις στο σωλήνα και ως εκ τούτου να επηρεαστεί ολόκληρο το δίκτυο με επιζήμιες συνέπειες. Από την άλλη πλευρά, οι παροδικές μετακινήσεις επηρεάζουν συνήθως

το σύνολο του δικτύου αγωγών, αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα ζημίας (δηλαδή, ρωγμές στα κατώτερα σημεία του αγωγού και διαρροές ανά μονάδα αγωγού. Έτσι, η ποσοτική εκτίμηση του γεω-κινδύνου και η αξιολόγηση του σχετικού ρίσκου για τον αγωγό είναι αναμφίβολα πολύ σημαντικά ζητήματα του σχεδιασμού του αγωγού.



Σχήμα 1.4: Είδη γεωκινδύνων για υποθαλάσσιους αγωγούς (www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise-A-Z/Offshore-geohazards).

1.2.5 Άλλοι Κίνδυνοι

Είναι γεγονός ότι οι σημαντικότεροι κίνδυνοι και οι κύριες αιτίες βλαβών για τα δίκτυα αγωγών υδρογονανθράκων προέρχονται από σεισμικές δράσεις. Ένας σεισμός μπορεί να επιδράσει πάνω στον αγωγό με διάφορους τρόπους, όπως είναι για παράδειγμα η ρευστοποίηση εδάφους, η κατολίπηση, η διέλευση του αγωγού από σεισμικό ρήγμα. Καθένα από τα παραπάνω φαινόμενα αν συμβεί υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί να επιφέρει την αστοχία του αγωγού. Πάντως, υπάρχουν και άλλοι κίνδυνοι που δεν σχετίζονται με τον σεισμικό κίνδυνο, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό χερσαίων ή υποθαλάσσιων αγωγών καθώς μπορούν να έχουν πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, την οικονομία, ακόμα και σε ανθρώπινες ζωές. Βέβαια, η τεχνογνωσία, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι σύγχρονοι κανονισμοί σχεδιασμού δικτύων κοινής ωφέλειας έχουν βοηθήσει στην επαρκή αντιμετώπιση και αυτών των κινδύνων.

Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας αγωγός υδρογονανθράκων είναι η δημιουργία υδριτών αερίου (Gas Hydrates) μέσα στον αγωγό. Πρόκειται για χημικές ενώσεις που ανήκουν στους κλειθρίτες (clathrates), δηλαδή ενώσεις που εγκλείουν άλλες ενώσεις. Στην περίπτωση του μεθανίου, οι υδρίτες μεθανίου είναι ένα κρυσταλλικό στερεό που αποτελείται από ένα μόριο μεθανίου που περιβάλλεται από συγκλίνοντα μόρια νερού, σε ένα μόριακό “κλουβί” με μορφή πάγου. Οι υδρίτες σχηματίζονται σε βάθη θάλασσας που κυμαίνονται από 200 έως 3000 μέτρα, κυρίως σε στρώματα κάτω ή πάνω στον πυθμένα, όπου επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης (μεγαλύτερης από 30 bar) και χαμηλής θερμοκρασίας (κάτω από 10 βαθμούς Κελσίου) και η οργανική ύλη είναι αρκετή ώστε να είναι δυνατή η βακτηριακή παραγωγή μεθανίου. Τα αποθέματα αυτά αποτελούν μεγάλη πηγή μεθανίου, για το μέλλον, αλλά ταυτόχρονα απειλούν τον πλανήτη με επιπλέον οικολογική καταστροφή στην περίπτωση που λιώσουν και απελευθερώσουν το μεθάνιό τους εξαιτίας της υπερθέρμανσης του πλανήτη από το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Όπως προαναφέρθηκε, οι υδρίτες μεθανίου αποτελούν μία από τις πολλά υποσχόμενες πηγές ενέργειας του 21^{ου} αιώνα. Τα παγκόσμια αποθέματα υδριτών αερίου είναι τεράστια κι εκτιμώνται σε χιλιάδες τρις. κυβικά μέτρα τα οποία αντιστοιχούν σε 100 και πλέον φορές τα μέχρι σήμερα γνωστά αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως. Όμως, οι επιπτώσεις δημιουργίας υδριτών μεθανίου είναι πολύ σοβαρές για το δίκτυο αγωγού καθώς προκαλούν σοβαρά προβλήματα σχετικά με τη διασφάλιση της ροής μέσα στον αγωγό.



Σχήμα 1.5: Μεγάλος υδριτης μεθανίου που δημιουργήθηκε μέσα σε υποθαλάσσιο αγωγό υδρογονανθράκων. (http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/hydrates_why.cfm)

Επιπροσθέτως, η εσωτερική πίεση ενός αγωγού, η εξωτερική πίεση που του ασκείται, η διάβρωση και οι μεταβολές θερμοκρασίας αποτελούν πολύ σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν τον λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος, αλλά και της κατάστασης της επικάλυψης ενός αγωγού υδρογονανθράκων. Επίσης, το γεγονός ότι οι αγωγοί κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μέσα για την προστασία από διάβρωση, ειδικά όταν ο αγωγός βρίσκεται σε υγρό περιβάλλον. Όταν ένας αγωγός τοποθετείται υποθαλάσσια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κίνδυνοι αστοχίας λόγω δυνάμεων που ασκούνται από υποθαλάσσια ρεύματα και κύματα. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν κόπωση στον αγωγό ή να του δημιουργήσουν μεγάλες τάσεις και παραμορφώσεις. Το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο όταν υπάρχουν τμήματα του αγωγού μεγάλου μήκους που δεν είναι τοποθετημένα στον πυθμένα αλλά «αιωρούνται» μεταξύ δύο στηριγμάτων. Η αντιμετώπιση των παραπάνω κινδύνων γίνεται με τη χρήση επικάλυψης σκυροδέματος για να προστεθεί βάρος στον αγωγό και με την αποφυγή της δημιουργίας μεγάλων «αιωρούμενων» τμημάτων (Guo et al., 2005).

Άλλες αιτίες για την πρόκληση αστοχιών ή διαρροών σε αγωγούς είναι αυτές που σχετίζονται με την κατασκευή ή την επιδιόρθωση του. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι διαρροές στις συγκολλήσεις ενός αγωγού. Ο κίνδυνος αυτός βέβαια μειώνεται διαρκώς επειδή όσο εξελίσσεται η τεχνολογία και οι τεχνικές συγκολλήσεων, αλλά και καθώς τα συγκολλούμενα τμήματα ενός αγωγού βρίσκονται συνήθως σε σταθερό έδαφος. Τα χτυπήματα κατά την επιδιόρθωση ενός αγωγού, οι συγκρούσεις με σκάφη ή δίχτυα αλιευτικών, η πραγματοποίηση εργασιών στην περιοχή τοποθέτησής του, όπως σκάψιμο, ή άλλα ανθρώπινα λάθη μπορούν επίσης συχνά να αποτελέσουν αιτία βλαβών (Hopkins, 2008).

Τέλος, ξεχωριστή κατηγορία μη σεισμικών κινδύνων για αγωγούς υδρογονανθράκων αποτελούν οι βανδαλισμοί, η κλοπή (κυρίως πετρελαίου), η δολιοφθορά και η τρομοκρατία. Τα φαινόμενα αυτά προφανώς δύσκολα αντιμετωπίζονται. Παρόλο που ένα τρομοκρατικό χτύπημα σε αγωγό υδρογονανθράκων δεν είναι από πλευράς εντυπώσεων κάτι θεαματικό, το γεγονός ότι οι αγωγοί εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις και ο κρίσιμος γεωπολιτικός και οικονομικός ρόλος τους, τους καθιστά δυνητικούς στόχους τρομοκρατικών ενεργειών. Για αυτόν τον λόγο, οι αγωγοί συχνά φυλάσσονται από στρατιωτικές δυνάμεις, ακόμα και ιδιωτικές, αν και γενικά η επίλυση τέτοιων ζητημάτων είναι κυρίως πολιτικό. Οι κλοπές είναι ένα πολύ επικίνδυνο φαινόμενο καθώς πέρα από τις καταστροφές στους αγωγούς έχει αποδειχτεί εξαιρετικά επικίνδυνο και για τους ίδιους τους κλέφτες. Σε χώρες της Αφρικής, της Ασίας και της Λατινικής Αμερικής έχουν καταγραφεί εκατοντάδες θάνατοι κατά την προσπάθεια κλοπής υδρογονανθράκων από αγωγούς. Μάλιστα, υπάρχουν διαφόρων μεγεθών

κλοπές, από μικροκλοπές μεμονωμένων ατόμων ή μικρών ομάδων, μέχρι και ομάδες που ανήκουν στο οργανωμένο έγκλημα που μπορούν να γεμίσουν ακόμα και δεξαμενόπλοια με κλεμμένο πετρέλαιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η λύση μπορεί να είναι η εναέρια εποπτεία, οι φράχτες και τα καλώδια οπτικών ινών που καταγράφουν διαταράξεις, αλλά γενικά είναι ένα πολιτικό ζήτημα - κοινωνικό και ένα θέμα με ευρύτερες προεκτάσεις που αφορά τους πληθυσμούς των αναπτυσσόμενων χωρών (Hopkins, 2008).

1.3 Υποθαλάσσιοι αγωγοί

Από το 1897 ξεκίνησαν οι πρώτες προσπάθειες για εξόρυξη και μεταφορά προϊόντων πετρελαίου στη θάλασσα. Η υπεράκτια εξερεύνηση και παραγωγή πετρελαίου άρχισε στο Summerland στην Καλιφόρνια. Ο πρώτος υποθαλάσσιος αγωγός κατασκευάστηκε στο Summerland, νοτιοανατολικά της Σάντα Μάρμπαρα. Από τότε οι υποθαλάσσιοι αγωγοί αποτελούν ένα αποτελεσματικό μέσο μεταφοράς ρευστών, δηλαδή, πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού.

Ορισμένα σημαντικά έργα υπεράκτιων αγωγών στην ευρύτερη περιοχή της νοτιανατολικής Ευρώπης είναι ο NordStream, ο TransAdriaticPipeline (TAP), ο αγωγός Nabucco, ο South Stream, ο αγωγός φυσικού αερίου Trans-Med και το σύστημα αγωγών διασύνδεσης Τουρκίας-Ελλάδας-Ιταλίας (ITGI) (βλ. Σχήμα 1.5). Όπως προαναφέρθηκε, τα εν λόγω μεγάλα έργα έχουν μεγάλο κόστος και επιπλέον παρουσιάζουν υψηλές πιθανότητες εμπλοκής σε γεωπολιτικές αντιπαραθέσεις, με αποτέλεσμα το πλάνο της κατασκευής τους να μπορεί να αλλάξει εξ ολοκλήρου ή ακόμα και να ακυρωθεί οποιαδήποτε στιγμή.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Σχήμα 1.6):

- Αγωγοί διανομής πετρελαίου ή/και φυσικού αερίου από διαφορετικά υποθαλάσσια κοιτάσματα σε υποθαλάσσιους συλλέκτες.
- Αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή/και φυσικού αερίου από υποθαλάσσιους συλλέκτες σε υπεράκτιες πλατφόρμες επεξεργασίας.
- Αγωγοί διανομής πετρελαίου ή/και φυσικού αερίου μεταξύ υπεράκτιων πλατφορμών.
- Κεντρικοί αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου ή/και φυσικού αερίου από υπεράκτιες πλατφόρμες στην ακτή.
- Αγωγοί διανομής νερού ή χημικών ουσιών από τις πλατφόρμες παραγωγής, διαμέσου υποβρύχιων συλλεκτών, σε φρεάτια έγχυσης (Guo et al., 2005).

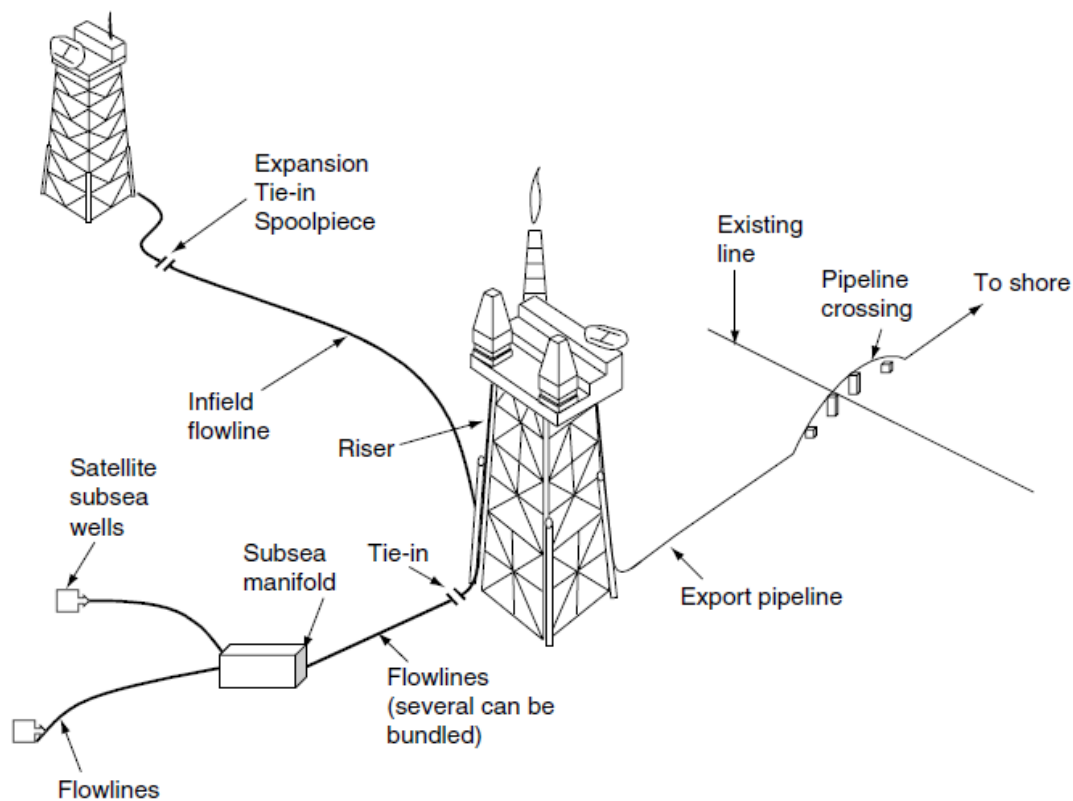
Ο σχεδιασμός των υπεράκτιων αγωγών συνήθως πραγματοποιείται σε τρία στάδια: το στάδιο της αρχικής προμελέτης, της μελέτης και τέλος το στάδιο της οριστικής μελέτης εφαρμογής. Κατά το πρώτο στάδιο, αντιμετωπίζονται τα θέματα της τεχνικής σκοπιμότητας και των περιορισμών σχετικά με το σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος. Αποκαλύπτονται πιθανά προβλήματα και οι μη βιώσιμες επιλογές απορρίπτονται. Επίσης συλλέγονται οι απαιτούμενες πληροφορίες για τον επικείμενο σχεδιασμό και την κατασκευή. Το αποτέλεσμα της προμελέτης επιτρέπει τον προγραμματισμό της κατασκευής και μια πρόχειρη εκτίμηση του κόστους του. Η βασική μελέτη καθορίζει σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια τον σχεδιασμό του αγωγού, έτσι ώστε το σύστημα να είναι ασφαλές (το μέγεθος του αγωγού, η ποιότητα υλικών, κλπ), παρέχει λεπτομέρειες για τον σχεδιασμό της διάταξης του αγωγού και πληροί όλες τις κανονιστικές απαιτήσεις κατασκευής και λειτουργίας. Στη φάση της μελέτης εφαρμογής, ο σχεδιασμός έχει ολοκληρωθεί με επαρκείς λεπτομέρειες για να μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς τα τεχνικά χαρακτηριστικά εισόδου για όλες τις δημόσιες συμβάσεις και την κατασκευή του έργου.



Σχήμα 1.6: Υφιστάμενο σύστημα αγωγών φυσικού αερίου στην Ευρώπη (Samaras, 2012).

1.4 Τοποθέτηση Υποθαλάσσιων Αγωγών

Οι υπεράκτιες δραστηριότητες που σχετίζονται με την εξερεύνηση και την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου αναπτύχθηκαν πολύ κατά τη διάρκεια των τελευταίων 40 ετών. Οι ανάγκες των εργασιών αυτών έχουν δημιουργήσει ένα μοναδικό κλάδο μηχανικής, την υπεράκτια μηχανική (off-shore engineering) που έχει προσελκύσει ιδέες και ανθρώπους από τις περισσότερες παραδοσιακές ειδικότητες των κλάδων της εφαρμοσμένης μηχανικής. Αυτός ο νέος κλάδος μηχανικής είναι υπεύθυνος για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία μιας πληθώρας νέων δομών, καθώς και των σκάφων που χρησιμοποιούνται για τις δομές αυτές. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διαδικασίες εγκατάστασης υποθαλάσσιων αγωγών και των βοηθητικών πλοίων περιγράφονται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.7: Χρήσεις υποθαλάσσιων αγωγών (Guo et al., 2005).

1.4.1 Μέθοδος S-lay

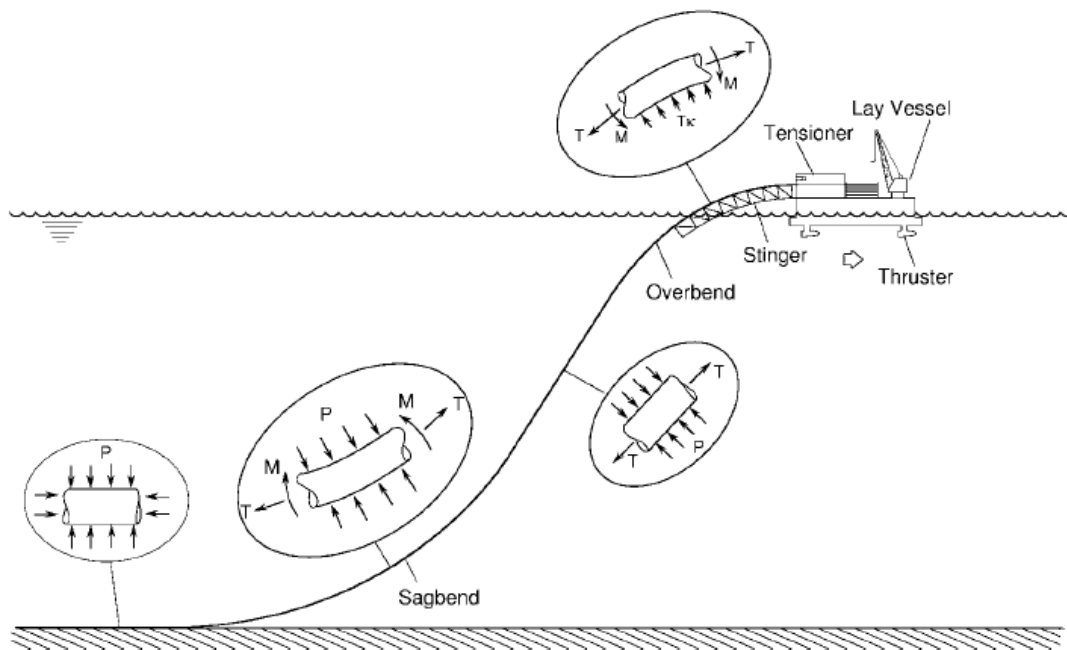
Η μέθοδος S-lay (τοποθέτηση τύπου S) αναφέρεται σε μια μέθοδο εγκατάστασης κατά την οποία ο αγωγός ξεκινά από οριζόντια θέση στο σκάφος και πλησιάζοντας στον βυθό, αποκτά ένα χαρακτηριστικό σχήμα S, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7. Ο αγωγός δέχεται εφελκυστικές δυνάμεις καθ' όλη τη διάρκεια της τοποθέτησης εκτός από το τελευταίο στάδιο,

που είναι η επαφή με τον πυθμένα, κατά το οποίο δέχεται θλιπτικές δυνάμεις κατά μήκος του, επιτυγχάνοντας έτσι την ισορροπία του.

Πρώτος ρόλος του σκάφους (lay vessel) είναι να δρα ως πλατφόρμα εργασιών για τη συναρμολόγηση του αγωγού. Οι συγκολλήσεις γίνονται με ακτίνες X και το σκάφος κινείται προς τα εμπρός, καθορίζοντας την κατεύθυνση του αγωγού. Ταυτόχρονα τα ήδη συγκολλημένα τμήματα αφήνονται στη θάλασσα με τη βοήθεια ειδικής δοκού. Παραδοσιακά, η S-lay υπήρξε η κύρια μέθοδος εγκατάστασης αγωγού για βάθη μέχρι και 1000 m. Πιο πρόσφατα, η S-lay χρησιμοποιείται ακόμα και σε βάθη έως 2000m.

1.4.2 Μέθοδος J-lay

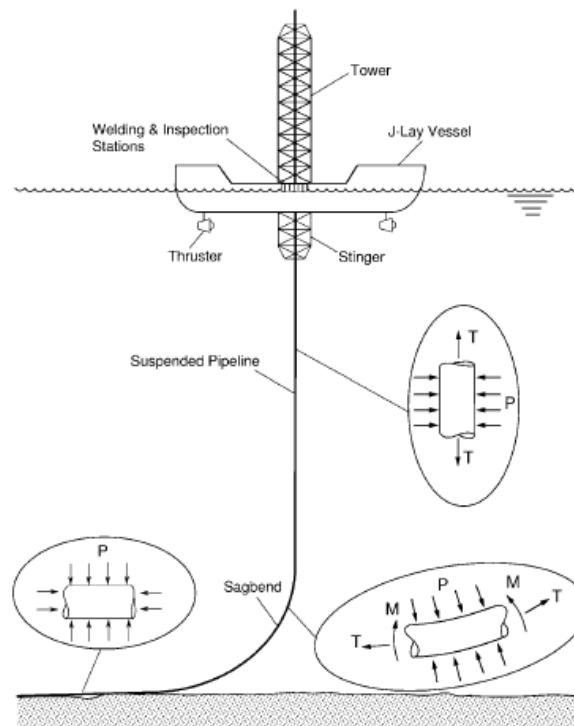
Η J-lay (τοποθέτηση τύπου J) είναι μία εναλλακτική μέθοδος εγκατάστασης στην οποία ο αγωγός βυθίζεται από μία σχεδόν κατακόρυφη θέση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.9. Οι πραγματικές γωνίες του πύργου εγκατάστασης κυμαίνονται μεταξύ 0° και 15° από την κατακόρυφο (Kyriakides & Corona, 2007).



Σχήμα 1.8: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου S-lay και των φορτίων που δέχεται ο αγωγός κατά την διαδικασία τοποθέτησης του (Kyriakides & Corona, 2007).

Στην πορεία προς το βυθό, ο αγωγός αποκτά το χαρακτηριστικό J-σχήμα από το οποίο προέρχεται και το όνομα J-lay. Στη μεθοδολογία J-lay συνήθως υπάρχει μόνο ένας σταθμός συγκόλλησης και ελέγχου του αγωγού. Χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα τμήματα αγωγού με σκοπό να αυξηθεί η αποδοτικότητα της λειτουργίας. Οι αγωγοί αποτελούνται συνήθως από

τέσσερα έως έξι τμήματα που έχουν ήδη συγκολληθεί στην ξηρά. Κάθε τμήμα ανυψώνεται στον πύργο (Σχήμα 1.5.3), ευθυγραμμίζεται, συγκολλείται, επιθεωρείται και τέλος επικαλύπτεται και βυθίζεται ενώ το σκάφος κινείται προς τα εμπρός, καθορίζοντας τη διεύθυνση του αγωγού. Μια δοκός καθοδηγεί την κατεύθυνση της γραμμής κοντά στην επιφάνεια του νερού. Καλύτερος έλεγχος προκύπτει επίσης από το γεγονός ότι μόνο ένα μικρό μήκος της γραμμής κοντά στην επιφάνεια εκτίθεται στο κύμα κίνησης. Η μέθοδος J-lay είναι κάπως πιο αργή από την παραδοσιακή S-lay, αλλά είναι ικανή να εγκαταστήσει αγωγούς σε βάθος 3.350 m (Kyriakides & Corona, 2007).



Σχήμα 1.9: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου J-lay και των φορτίων που δέχεται ο αγωγός κατά την διαδικασία τοποθέτησης του (Kyriakides & Corona, 2007).

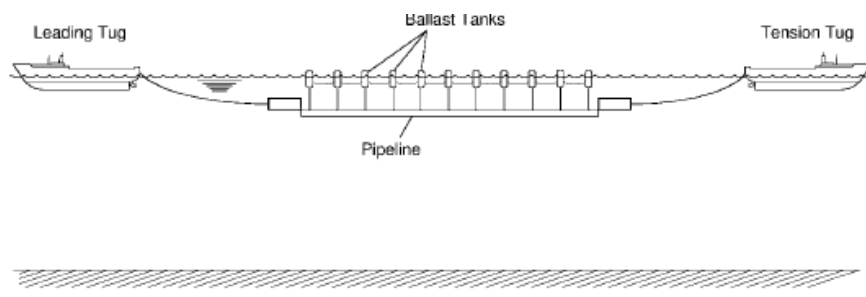
1.4.3 Μέθοδος Reel-lay

Μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την εγκατάσταση υποθαλασσιών αγωγών είναι η μέθοδος Reel-lay. Κάποιες από τις πρώτες εφαρμογές της μεθόδου έλαβαν τόπο κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πόλεμου (Kyriakides & Corona, 2007). Στη μέθοδο αυτή ένα τμήμα του αγωγού, συνήθως μεγάλου μεγέθους, τυλίγεται πάνω σε κύλινδρο μεγάλης διαμέτρου που είναι τοποθετημένος πάνω στο πλοίο, ενώ είναι αγκυροβολημένο σε μια θέση. Στη συνέχεια, το πλοίο κινείται κατά μήκος της διαδρομής και εγκαθιστά τον αγωγό σταδιακά.

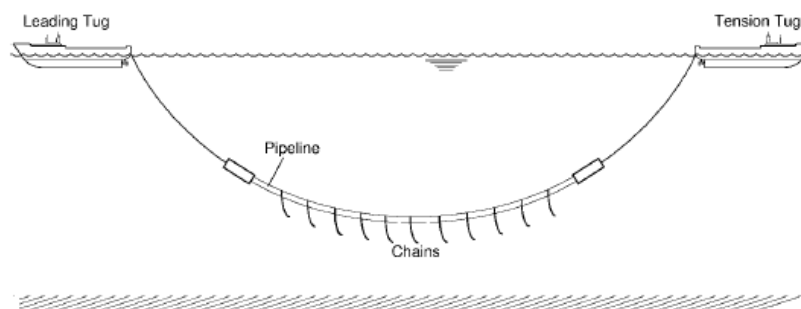
Η μέθοδος Reel-lay μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αγωγούς με διάμετρο έως και 45 cm. Η εναπόθεση του αγωγού στον πυθμένα γίνεται είτε με την S-lay είτε με την J-lay μέθοδο ανάλογα με το πλοίο που χρησιμοποιείται και το βάθος της θάλασσας. Βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικάλυψη από σκυρόδεμα στους αγωγούς αλλά και ότι εξαιτίας του τυλίγματος, ο αγωγός μπορεί να παραμορφωθεί πλαστικά και να μειωθεί η αντοχή του (Guo et al., 2005).

1.4.4 Tow Μέθοδος

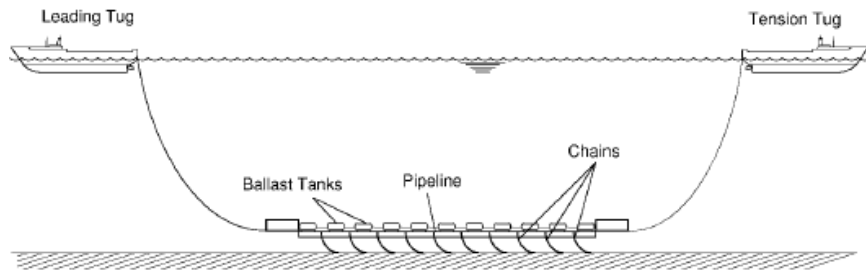
Μια άλλη μέθοδος κατασκευής και εγκατάστασης υποθαλάσσιων αγωγών είναι η μέθοδος ρυμούλκησης (Tow method). Κατά τη μέθοδο αυτή ένα τμήμα του αγωγού κατασκευάζεται στην ξηρά και στη συνέχεια ρυμουλκείται στην τοποθεσία εγκατάστασης χρησιμοποιώντας μία από τις μεθόδους που παρουσιάζεται στα Σχήματα 1.10(α) έως 1.10(δ). Ένα πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι η συγκόλληση, η επιθεώρηση και οι δοκιμές διεξάγονται στην ξηρά πριν από την εγκατάσταση. Ανάλογα με τις δυνατότητες του κατασκευαστή, τα βάθη τοποθέτησης, τα χαρακτηριστικά του πυθμένα και πιθανά εμπόδια που μπορεί να προκύψουν για τον αγωγό επιλέγεται αν η ρυμούλκηση θα γίνει: (α) στον βυθό, (β) κοντά σε αυτόν (Off-Bottom Tow), (γ) σε ένα μέσο βάθος (Mid-depth Tow) ή (δ) στην επιφάνεια της θάλασσας (SurfaceTow) (Guo et al., 2005).



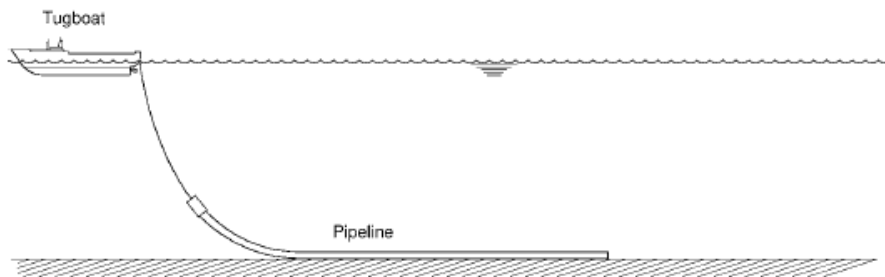
Σχήμα 1.10(α): Απεικόνιση της μεθόδου ρυμούλκησης (Tow Method) α) στον βυθό (Bottom Tow) (Guo et al., 2005).



Σχήμα 1.10(β): Απεικόνιση της μεθόδου ρυμούλκησης (Tow Method) β) κοντά στον βυθό (Off-Bottom Tow) (Guo et al., 2005).



Σχήμα 1.10(γ): Απεικόνιση της μεθόδου ρυμούλκησης (*Tow Method*) σε ένα μέσο βάθος (*Mid-depth Tow*) (Guo et al., 2005).



Σχήμα 1.10(δ): Απεικόνιση της μεθόδου ρυμούλκησης (*Tow Method*) στην επιφάνεια της θάλασσας (*Surface Tow*)(Guo et al., 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κανονιστικές Οδηγίες Υποθαλάσσιων Αγωγών

Η αύξηση των ενεργειακών αναγκών των μεγάλων βιομηχανικών κρατών και η ανάγκη εκμετάλλευσης όλο και πιο δυσπρόσιτων κοιτασμάτων έχουν ως συνέπεια να εντείνονται συνεχώς οι προσπάθειες για τον ορθό και ασφαλή σχεδιασμό των δικτύων αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου. Γι' αυτόν τον λόγο, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφορα διεθνή και εθνικά πρότυπα για τον ορθό σχεδιασμό δικτύων αγωγών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά, βασικά μέρη του σχεδιασμού δικτύων αγωγών σύμφωνα με τον Νορβηγικό Κανονισμό DNV. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέχρι σήμερα κανονισμοί δεν έχουν επεκταθεί στον αντισεισμικό κανονισμό υποθαλάσσιων αγωγών, αλλά περιορίζονται κυρίως στους χερσαίους αγωγούς (υπόγειους και υπέργειους).

Πριν από την αξιολόγηση των κινδύνων, πρέπει να είναι προετοιμασμένη μια πλήρης περιγραφή του συστήματος. Η περιγραφή πρέπει να καλύπτει το σύνολο του αγωγού και θα πρέπει έστω και κατ' ελάχιστον να εξετάσει τα ακόλουθα. Αρχικά τις δραστηριότητες που ενδεχομένως επηρεάζουν την ακεραιότητα του αγωγού ως προς τον χειρισμό του γερανού στην πλατφόρμα, την αλιεία (τράτες βυθού), τα βοηθητικά σκάφη και την κυκλοφορία των πλοίων στην περιοχή, ή κοντά στην περιοχή τις υποθαλάσσιες εργασίες (π.χ., ταυτόχρονες εργασίες, όπως γεωτρήσεις) κ.α. Στη συνέχεια, τα φυσικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, τον τύπο, τη διάμετρο, το πάχος τοιχώματος, το πάχος επικάλυψης, το υλικό (χάλυβας και επίστρωση), τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και το περιεχόμενο (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, απόβλητα, νερό, κλπ). Τέλος, πρέπει να εξετάζονται τα μέτρα μετριασμού/προστασίας.

2.1 Αλληλεπίδραση Εδάφους – Αγωγού

Το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί ως συνεκτικό (αργίλους) ή μη συνεκτικό (αμμώδη). Ως βάση της αξιολόγησης της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι: ο τύπος του εδάφους, οι επί τόπου (in-situ) τάσεις, ο συντελεστής απόσβεσης ως συνάρτηση της διατμητικής τάσης, οι παράμετροι καθίζησης του εδάφους, τα γενικά δεδομένα του εδάφους όπως το ειδικό βάρος (γ_{soil}), ο λόγος κενών (e_s), η γωνία τριβής συνεκτικών εδαφών (Φ_s), η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για συνεκτικά εδάφη (s_u), ο δείκτης στερεοποίησης (OCR) και ο δείκτης πλαστικότητας για συνεκτικά εδάφη (i_p) (DNV-RP-F105, 2006).

Οι παράμετροι που αναφέρονται παραπάνω υπολογίζονται με τη βοήθεια κατάλληλων γεωτεχνικών δοκιμών σε καλό εδαφικό δείγμα και είναι αντιπροσωπευτικοί για την ιδιαίτερη γεωγραφική θέση του αγωγού. Οι τιμές που δίνονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2 μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως οδηγός στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού.

Τύπος Εδάφους	Φ_s	γ'_{soil} [kN/m ³]	ν	e_s
Μαλακό	28-30°	8.5-11.0	0.35	0.7-0.9
Μέσης Πυκνότητας	30-36°	9.0-12.5	0.35	0.5-0.8
Πυκνό	36-41°	10.0-13.5	0.35	0.4-0.6

Πίνακας 2.1: Τυπικές γεωτεχνικές παράμετροι για άμμο (DNV-RP-F105, 2006).

Τύπος Εδάφους	s_u [kN/m ²]	γ'_{soil} [kN/m ³]	ν	e_s
Πολύ μαλακό	< 12.5	4 – 7	0.45	1.0 – 3.0
Μαλακό	12.5 – 25	5 – 8	0.45	0.8 – 2.5
Σταθερό	25 – 50	6 – 11	0.45	0.5 – 2.0
Πολύ σταθερό	100-200	10-13	0.45	0.3-0.9
Σκληρό	>200	10-13	0.45	0.3-0.9

Πίνακας 2.2: Τυπικές γεωτεχνικές παράμετροι για άργιλο (DNV-RP-F105, 2006).

Οι αβεβαιότητες όσον αφορά τα δεδομένα του εδάφους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Αυτές οι αβεβαιότητες μπορεί να προκύψουν από μεταβολές στις συνθήκες του εδάφους κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού και δυσκολίες στον αξιόπιστο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του ανώτερου στρώματος του εδάφους, το οποίο είναι το πιο σημαντικό για τον αγωγό. Στο πλαίσιο αυτό, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα εδαφολογικά δεδομένα σε βάθος ίσο με περίπου 0.5-1.0 φορές τη διάμετρο του αγωγού.

Σε γενικές γραμμές, η χαμηλή αντοχή του εδάφους θεωρείται ευεργετική για τον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλή αντοχή του εδάφους οδηγεί σε μεγαλύτερη διείσδυση, μείωση των μήκων των ανοιγμάτων και υψηλότερη πλευρική αντίσταση. Για τους λόγους αυτούς, ο σχεδιασμός θα πρέπει κανονικά να βασίζεται σε ακριβείς εκτιμήσεις της αντοχής του εδάφους. Σε υφιστάμενους αγωγούς για να ληφθούν υπόψη απρόβλεπτες επιπτώσεις, η διαθέσιμη αντίσταση του εδάφους θα πρέπει να υπολογίζεται με βάση πιο συντηρητικές εκτιμήσεις της αντοχής του εδάφους.

2.1.1 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού

Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού είναι σημαντική για τη διαμόρφωση των σχέσεων στατικής ισορροπίας αλλά και τη δυναμική απόκριση ενός αγωγού. Για την προσομοίωση της αντίστασης εδάφους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

- Η τοπογραφία του βυθού, κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού.
- Η αντίσταση του εδάφους και οι μη-γραμμικές, κάθετες στον αγωγό, δυνάμεις επαφής.
- Η αξονική ολίσθηση, ενώ για δυναμικές αναλύσεις εξετάζονται και εγκάρσιες διευθύνσεις.
- Τα βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα χαρακτηριστικά δυσκαμψίας και απόσβεσης του συστήματος

Η τοπογραφία του βυθού της θάλασσας μπορεί να ορίζεται από ένα κάθετο προφίλ κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού. Η απόσταση των δεδομένων σημείων που θα χαρακτηρίζουν το προφίλ θα πρέπει να σχετίζεται με την πραγματική τραχύτητα του βυθού. Οι αξονικοί και πλευρικοί συντελεστές τριβής μεταξύ του αγωγού και του πυθμένα της θάλασσας πρέπει να αντικατοπτρίζουν την πραγματική κατάσταση του θαλάσσιου βυθού, της τραχύτητας, του αγωγού και της παθητικής αντίστασης του εδάφους. Η αξονική και πλευρική αντίσταση δεν είναι πάντοτε καθαρός τύπος τριβής, καθώς ραγδαίες μεταβολές στις κατακόρυφες τάσεις προκαλούνται από τις πιέσεις των πόρων. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως η πλευρική αντίσταση θα έχει μια συνεισφορά λόγω της διείσδυσης του αγωγού στο μαλακό βυθό, τη συγκέντρωση υλικών γύρω από αυτόν, κλπ.

Για άμμους με χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά, η συνιστώσα της τριβής της αξονικής και της πλευρικής αντίστασης, είναι συνεχώς ανάλογη προς την κατακόρυφη δύναμη. Η δυσκαμψία του εδάφους για την κατακόρυφη φόρτιση θα πρέπει να αξιολογείται με διαφορετικό τρόπο σε στατικές και σε δυναμικές αναλύσεις. Η στατική απόκριση του εδάφους θα επηρεάζεται κυρίως από τη μέγιστη αντίδραση, συμπεριλαμβανομένων και

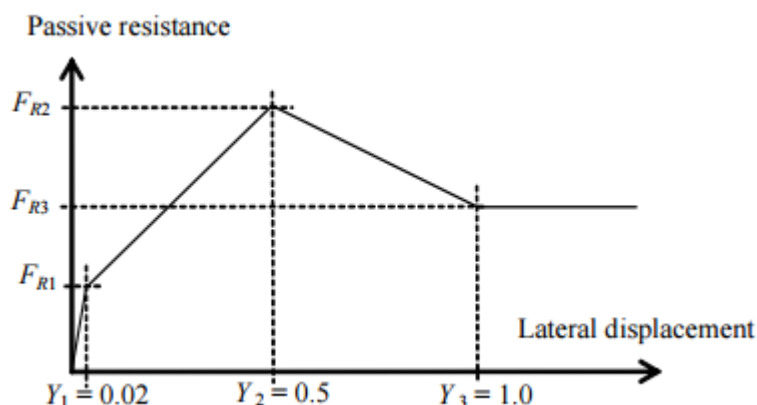
ορισμένων κυκλικών επιπτώσεων. Η δυναμική δυσκαμψία θα χαρακτηρίζεται κυρίως από τις καταστάσεις επαναφόρτισης και αποφόρτισης (DNV-RP-F105, 2006).

2.1.2 Αντίσταση Εδάφους

Η αντίσταση του εδάφους αποτελείται γενικά από δύο μέρη: την τριβή Coulomb και την παθητική αντίσταση που οφείλεται στην συσσώρευση εδάφους, καθώς ο αγωγό μετακινείται πλαγίως. Οι πιο σημαντικές παράμετροι για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης άμμου - αγωγού είναι ο συντελεστής τριβής και το κορεσμένο ειδικό βάρος της άμμου.

Ως άργιλος θεωρείται ένα έδαφος που δεν είναι διαπερατό και με σημαντική συνεκτικότητα, ενώ ως βράχος ορίζεται το έδαφος με 50% της διαμέτρου των σωματιδίων του μεγαλύτερη από 50 mm. Ο συντελεστής τριβής, μ , μπορεί να ληφθεί -για αγωγό με επικάλυψη από σκυρόδεμα- ίσος με 0.6 για άμμο, 0.2 για άργιλο και 0.6 για βράχο. Ένα μοντέλο παθητικής αντίστασης σε άμμο και πηλό περιγράφεται παρακάτω, ενώ η επίδραση αυτή θα πρέπει να παραμεληθεί για βράχο. Ένα τυπικό μοντέλο για παθητική αντίσταση του εδάφους αποτελείται από τέσσερις διακριτές περιοχές (βλ. Σχήμα 2.1):

1. Μια ελαστική περιοχή όπου η πλευρική μετατόπιση είναι συνήθως μικρότερη από το 2% της διαμέτρου του σωλήνα.
2. Μια περιοχή όπου μπορεί να συμβεί σημαντική μετατόπιση, μέχρι το ήμισυ της διαμέτρου του σωλήνα για αμμώδη και αργιλώδη εδάφη, στην οποία η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού προκαλεί μια αύξηση της διείδυσης και κατά συνέπεια και της παθητικής αντίστασης του εδάφους.
3. Μετά από το οριακό σημείο, όπου η αντίσταση και η διείδυση μειώνονται.
4. Όταν η μετατόπιση υπερβαίνει συνήθως τη διάμετρο του σωλήνα, η παθητική αντίσταση και η διείδυση μπορεί να θεωρηθούν σταθερές.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα παθητικής αντίστασης σε σχέση με την πλευρική μετατόπιση (Yuan et al., 2014).

Στην ελαστική περιοχή, $Y \leq Y_1$, η δυσκαμψία k μπορεί να ληφθεί ως 50-100 N/m για άμμο και 20-40 N/m για άργιλο. Η δυσκαμψία αυξάνεται με την πυκνότητα της άμμου και τη δύναμη διάτμησης της αργίλου. Στην περιοχή $Y_1 < Y \leq Y_2$, η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού δημιουργεί έργο το οποίο αυξάνει και πάλι τη διείδυση, άρα και την παθητική αντίσταση. Η τιμή της αντίστασης FR_2 , στο οριακό σημείο, δεν μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων, καθώς εξαρτάται από τη συσσωρευμένη μετατόπιση του αγωγού στην περιοχή μεταξύ Y_1 και Y_2 . Εάν η μετατόπιση υπερβαίνει την Y_2 , ο αγωγός αναμένεται να αστοχήσει. Η διείδυση μειώνεται γραμμικά από το οριακό σημείο Y_2 στο μισό της για μετατόπιση $Y = Y_3$ και η παθητική αντίσταση μειώνεται αναλόγως. Για μια μετατόπιση μεγαλύτερη από Y_3 , η διείδυση και η παθητική αντίσταση μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένουν σταθερές.

Η παθητική αντίσταση F_R στην άμμο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{F_R}{F_C} = \begin{cases} (5.0 * \kappa_S - 0.15 * \kappa_S^2) * \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25}, & \text{αν } \kappa_S \leq 26.7 \\ \kappa_S * \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25}, & \text{αν } \kappa_S > 26.7 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\kappa_S = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{w_s - F_Z} = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{F_C}, \quad F_C = w_s - F_Z,$$

όπου, F_R η παθητική αντίσταση εδάφους, F_C η κατακόρυφη δύναμη επαφής εδάφους-αγωγού, F_Z το κάθετο υδροδυναμικό φορτίο, z_p το βάθος διείδυσης, w_s το βυθισμένο βάρος αγωγού ανα μονάδα μήκους, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, συμπεριλαμβανομένης και της επίστρωσης και γ_s το ξηρό βάρος του εδάφους, το οποίο μπορεί να ληφθεί ως 18 kN/m³ για άργιλο. Η παθητική αντίσταση στην άργιλο μπορεί να ληφθεί από την σχέση:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1 \cdot \kappa_C}{G_C^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.31} \quad (2.2)$$

όπου (G_C) η παράμετρος αντοχής του εδάφους, $G_C = \frac{s_u}{D \cdot \gamma_s}$ και

$$\kappa_C = \frac{s_u \cdot D}{w_s - F_Z} = \frac{s_u \cdot D}{F_C}$$

Πρέπει να τονιστεί ότι οι παράμετροι του εδάφους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παθητικής αντίστασης ισχύουν κατά την πραγματική διείσδυση του αγωγού. Η συνολική διείσδυση μπορεί να ληφθεί ως το άθροισμα της αρχικής διείσδυσης και της διείσδυσης λόγω της κίνησης του αγωγού:

$$z_p = z_{pi} + z_{pm} \quad (2.3)$$

Η αρχική διείσδυση στην άμμο προκύπτει από:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.037 \cdot \kappa_s^{-0.67} \quad (2.4)$$

Η αρχική διείσδυση στην άργιλο προκύπτει από:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{\kappa_c}\right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{\kappa_c}\right)^{0.7} \quad (2.5)$$

Η συνολική διείσδυση μπορεί να ληφθεί ως το άθροισμα της αρχικής διείσδυσης η οποία οφείλεται στο βάρος του αγωγού, της διείσδυσης λόγω των φορτίων κατά την τοποθέτηση και της διείσδυσης λόγω της κίνησης του αγωγού εξαιτίας των υποθαλάσσιων ρευμάτων. Για τον υπολογισμό των κ_s και κ_c για την αρχική διείσδυση στην άμμο και στον άργιλο, μπορεί να θεωρηθούν μέγιστο βάρος του αγωγού και μηδενική δύναμη ανύψωσης. Για έναν αγωγό ο οποίος βρίσκεται σε τάφρο, η αντίσταση από τις πλευρές της τάφρου μπορεί να διατυπωθεί με μια ισοδύναμη διείσδυση ως εξής:

$$\frac{z_{pt}}{D} = \frac{1}{2} \cdot \tan\theta \quad \text{ωστόσο, } \leq \frac{z_t}{2} \quad (2.6)$$

όπου, z_{pt} το βάθος διείσδυσης στην τάφρο και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, συμπεριλαμβανομένης και της επίστρωσης. Η τελευταία αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου ο αγωγός έχει μετακινηθεί, σε απόσταση ίση με τη μισή του διάμετρο, σε πλευρά τάφρου με γωνία κλίσης θ , αλλά περιορίζεται στο μισό βάθος της τάφρου z_t (DNV-RP-F109, 2010).

2.2 Άνωση αγωγού

Προκειμένου να αποφευχθεί η επίπλευση του αγωγού, το βυθισμένο βάρος του αγωγού πρέπει να πληροί το εξής κριτήριο:

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{w_s + b} = \frac{\gamma_w}{s_g} \leq 1.00 \quad (2.7)$$

όπου γ_w ο συντελεστής ασφαλείας, b η άνωση αγωγού ανα μονάδα μήκους, w_s το βυθισμένο βάρος αγωγού ανα μονάδα μήκους και s_g η πυκνότητα του αγωγού. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας γ_w ισούται με 1.1 (DNV-RP-F109, 2010).

2.3 Χάραξη Αγωγού

Η χάραξη του αγωγού θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την ανθρώπινη ασφάλεια του, την προστασία του περιβάλλοντος και την πιθανότητα βλάβης στον αγωγό ή σε άλλες εγκαταστάσεις. Η συμφωνία με τις ομάδες ενδιαφέροντος θα πρέπει να επιδιωχθεί όσο το δυνατόν νωρίτερα. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη πρέπει να περιλαμβάνουν τα παρακάτω.

- Ως προς το περιβάλλον: τις περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, την έκθεση σε περιβαλλοντικούς κινδύνους, τις περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλους, τα θαλάσσια πάρκα και τις θαλάσσιες ροές (turbidity flows).
- Ως προς τα χαρακτηριστικά του βυθού: βαθυμετρίες, αστάθειες, τις ιδιότητες του εδάφους (βραχώδεις περιοχές, μαλακά ιζήματα και μετακινήσεις ιζημάτων), τις καθιζήσεις και τη σεισμοτεκτονική δραστηριότητα
- Ως προς τις εγκαταστάσεις: τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις, τις υποθαλάσσιες δομές, τα πηγάδια, τους υφιστάμενους αγωγούς και τα καλώδια, τα εμπόδια και τις εργασίες για την προστασία των ακτών.
- Ως προς τις δραστηριότητες τρίτων: την κυκλοφορία πλοίων, την αλιευτική δραστηριότητα, τις περιοχές απόρριψης αποβλήτων, πυρομαχικών, κ.λπ., τις μεταλλευτικές δραστηριότητες, τις περιοχές στρατιωτικής άσκησης.
- Ως προς την σύνδεση με χερσαία τμήματα: τους τοπικούς περιορισμούς, τις περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, την εγγύτητα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, κλπ.

Κατά την επιλογή της διαδρομής του αγωγού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μελλοντικές δραστηριότητες αλλά και οι αναμενόμενες γεωπολιτικές εξελίξεις στην περιοχή του αγωγού. Θα πρέπει να διεξαχθούν έρευνες κατά μήκος της συνολικής προγραμματισμένης διαδρομής του αγωγού για να προσφέρουν επαρκή δεδομένα για το σχεδιασμό και τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την υλοποίηση του έργου. Η απαιτούμενη ακρίβεια της έρευνας μπορεί να ποικίλει κατά μήκος της προτεινόμενης διαδρομής. Πιθανά εμπόδια, το υπέδαφος, η τοπογραφία του βυθού, ασυνήθιστες ή/και επικίνδυνες υποθαλάσσιες συνθήκες μπορεί να ενδέχεται να απαιτήσουν πιο λεπτομερείς έρευνες. Η ακρίβεια της έρευνας πρέπει να είναι επαρκής για όλα τα στάδια σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας με ασφάλειας του αγωγού. Πρέπει να εκτελούνται έρευνες για να εντοπιστούν πιθανά θέματα που αφορούν τις υπάρχουσες και σχεδιαζόμενες εγκαταστάσεις, αλλά και για πιθανά ναυάγια ή εμπόδια. Τα υφιστάμενα υποθαλάσσια έργα περιλαμβάνουν άλλους υποβρύχιους αγωγούς και καλώδια τροφοδοσίας και επικοινωνίας.

Τα αποτελέσματα των ερευνών θα πρέπει να παρουσιάζονται σε ακριβείς χάρτες διαδρομών, και η κλίμακα θα πρέπει να είναι ανάλογη με την απαιτούμενη χρήση. Πρέπει να αναφέρονται η θέση του αγωγού, σε σχέση με εγκαταστάσεις και σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του θαλάσσιου βυθού και όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Για περιοχές όπου υπάρχουν ενδείξεις αυξημένης γεωλογικής δραστηριότητας ή επαναληψιμότητα σημαντικών σεισμοτεκτονικών γεγονότων και πάλι μπορεί να επηρεάσουν τον αγωγό, θα πρέπει να εκτελούνται πρόσθετες γεωλογικές μελέτες. Οι μελέτες αυτές μπορεί να συμπεριλαμβάνουν εκτενή γεωφυσική έρευνα, ηφαίστεια λάσπης ή δραστηριότητα κρατήρων, μετακινήσεις τεκτονικών ρηγμάτων, κατολισθήσεις, χείμαρρους λάσπης (mudflow), κ.α.

2.4 Απαιτήσεις για την τοποθέτηση υποθαλασσίων αγωγών

Οι απαιτήσεις που αναλύονται στη συνέχεια ισχύουν γενικά για την εγκατάσταση του αγωγών, ανεξάρτητα από τη μέθοδο εγκατάστασης. Μια ενδεδειγμένη μελέτη πρέπει να διεξαχθεί για να καθορίσει την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου εγκατάστασης και τα φορτία που θα ασκηθούν κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Πρέπει επίσης να καθοριστεί η επικοινωνία με ομάδες που ενδέχεται να επηρεαστούν από τις δραστηριότητες ή μπορεί να επηρεάσουν την κατασκευή του έργου. Επίσης, πρέπει να καθοριστούν οι αρμοδιότητες όλων των εμπλεκόμενων και η μεταξύ τους επικοινωνία.

Ο χειρισμός και η αποθήκευση των αγωγών και των υλικών στα πλοία πρέπει να εξασφαλίζουν ότι θα αποφευχθεί οποιοσδήποτε κίνδυνος για το προσωπικό, τον αγωγό, τις επικαλύψεις, και τον συνοδευτικό εξοπλισμό. Οι ιμάντες και ο λοιπός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι σχεδιασμένα για την πρόληψη ζημιών του προϊόντος. Η αποθήκευση των σωλήνων και των άλλων εξαρτημάτων πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να αντέχουν τα φορτία σχεδιασμού. Όλο το υλικό που αποστέλλεται για εγκατάσταση πρέπει να καταγράφεται, να επιθεωρείται για ζημιές, να ελέγχεται ως προς την ποσότητα και να ταυτοποιείται κατά την άφιξη. Κατεστραμμένα αντικείμενα θα πρέπει να εντοπισθούν, να επισκευαστούν ή να λάβουν την κατάλληλη σήμανση και να επιστραφούν στην ξηρά.

Οι αγωγοί και οι συναρμολογήσεις θα πρέπει να επιθεωρούνται και να καθαρίζονται εσωτερικά πριν προστεθούν στη γραμμή. Η μέθοδος καθαρισμού θα πρέπει να μην προκαλέσει καμία ζημιά σε οποιαδήποτε εσωτερική επίστρωση. Επίσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης των αγωγών για να διατηρεί αρχεία του αριθμού των συγκολλήσεων, του αριθμού των σωληνώσεων, των αποτελεσμάτων των ελέγχων μη καταστρεπτικών δοκιμών, των μηκών των σωληνώσεων, της εγκατάστασης

ανόδου, των αρθρώσεων και των συναρμολογήσεων. Τα επιμέρους τμήματα του αγωγού πρέπει να έχουν μόνιμη σήμανση σύμφωνα με το υφιστάμενο σύστημα παρακολούθησης. Η σήμανση πρέπει να είναι ικανή να αναγνωριστεί από υποβρύχιο όχημα με τηλεχειρισμό (ROV). Αν ένα τμήμα καταστραφεί ή αντικατασταθεί, κάθε επακόλουθη σήμανση θα πρέπει να διατηρηθεί.

Η διαμόρφωση και τα φορτία της τοποθέτησης πρέπει να ελέγχονται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι είναι εντός των καθορισμένων παραμέτρων σχεδιασμού κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Η διαμόρφωση και τα φορτία μπορεί να ελέγχεται με διάφορα μέσα, και να περιγράφονται με σαφήνεια συμπεριλαμβανομένων των επιτρεπόμενων ορίων για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση. Ο αγωγός θα πρέπει να εγκατασταθεί εντός της χάραξης του σύμφωνα με τη μελέτη τοποθέτησης και να έχει την επιθυμητή γωνία κλίσης (DNV-RP-F107, 2010). Αποκλίσεις από το συγκεκριμένο διάδρομο πρέπει να ελέγχονται και να επαληθεύονται ή να διορθώνονται πριν συνεχιστεί η τοποθέτηση των επόμενων τμημάτων. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής κάμψης, πρέπει να παρακολουθείται το διάγραμμα φορτίων του ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής πρέπει να επιθεωρηθεί σε περίπτωση λυγισμού. Εάν η επιθεώρηση παρουσιάζει ενδείξεις λυγισμού ή εισροής νερού, θα πρέπει να διερευνηθεί ενδελεχώς και να εκτελεστούν διορθωτικά μέτρα.

Πριν την οριστική τοποθέτηση του αγωγού τον πυθμένα, θα πρέπει να αφαιρεθεί όλος ο εσωτερικός του εξοπλισμός, εκτός από τον ανιχνευτή κάμψης. Όλες οι συγκολλήσεις θα πρέπει να πληρωθούν σε ένα επίπεδο που ο αγωγός να μπορεί να εναποτεθεί με ασφάλεια και να ανακτηθούν από το βυθό της θάλασσας, κάτι το οποίο πρέπει να ορίζεται με σαφήνεια εκ των προτέρων. Κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης, θα πρέπει να παρακολουθούνται και οι καταπονήσεις στο σύστημα τοποθέτησης (καλώδια, πύργος, κλπ). Η σύνδεση στο άκρο του κάθε καλωδίου του συστήματος τοποθέτησης πρέπει να είναι εύκολα ανακτήσιμη ανεξάρτητα από τα κύματα και τις τρέχουσες συνθήκες. Μετά την τοποθέτηση, ο αγωγός θα πρέπει να ερευνηθεί σε ορισμένο μήκος μακριά από την περιοχή εγκατάλειψης, ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν έχει επέλθει καμία ζημιά. Καταδύσεις και υποβρύχιες εργασίες πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με τις συμφωνημένες διαδικασίες που καλύπτουν τις ισχύουσες κανονιστικές απαιτήσεις.

2.5 Ταξινόμηση Βλαβών

Οι βλάβες στους αγωγούς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (DNV-RP-F107, 2010):

Μικρή βλάβη (D1): Βλάβες που δεν απαιτούν επισκευή, ούτε οδηγούν σε διαρροές των υδρογονανθράκων. Μικρότερα χτυπήματα στα τοιχώματα αγωγού από χάλυβα, π.χ., μέχρι 5% της διαμέτρου, κανονικά δεν θα έχουν καμία άμεση επίδραση της λειτουργίας των γραμμών. Αυτό το όριο ποικίλει και θα πρέπει να αξιολογείται για κάθε αγωγό ξεχωριστά. Ωστόσο, εάν συμβεί μια τέτοια μικρή βλάβη, θα πρέπει να προετοιμαστούν επιθεωρήσεις και τεχνικές αξιολογήσεις έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η δομική ακεραιότητα του αγωγού. Μικρές ζημιές σε εύκαμπτα σημεία δεν απαιτούν επισκευή. Κάθε τοπική βλάβη στα προστατευτικά επιστρώματα κανονικά δεν απαιτεί κάποια επισκευή.

Μέτρια βλάβη (D2): Βλάβη που απαιτεί επισκευή, αλλά δεν προκαλεί διαρροές των υδρογονανθράκων. Διείσδυση του θαλασσινού νερού στην επίστρωση μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση του αγωγού. Ωστόσο, η επισκευή μπορεί να αναβληθεί για κάποιο χρονικό διάστημα και ο αγωγός μπορεί να λειτουργεί υπό την προϋπόθεση ότι έχει επιβεβαιωθεί η δομική του ακεραιότητα.

Σημαντική βλάβη (D3): Βλάβες που οδηγούν σε διαρροές. Εάν το τοίχωμα του αγωγού αστοχήσει, η λειτουργία του αγωγού θα πρέπει να διακοπεί αμέσως και να επισκευαστεί. Το κατεστραμμένο τμήμα πρέπει να αφαιρεθεί και να αντικατασταθεί. Σε περίπτωση βλάβης που οδηγεί σε διαρροή (D3), αυτή ταξινομείται περαιτέρω ως εξής:

- Μηδενική διαρροή (R0): Οι διαρροές δεν έχουν ακόμα ξεκινήσει.
- Μικρή διαρροή (R1): Απελευθέρωση από τις μικρές και μεσαίες τρύπες στο τοίχωμα του αγωγού (<διαμέτρου 80 mm). Ο αγωγός μπορεί να απελευθερώνει μικρές ποσότητες περιεχομένου μέχρι να εντοπιστεί το σημείο βλάβης είτε από πτώση πίεσης είτε με επιθεώρηση.
- Σημαντικές διαρροές (R2): Διαρροές από μεγάλη διάρρηξη του αγωγού. Πλήρης αστοχία θα οδηγήσει σε ολική απελευθέρωση του περιεχομένου του αγωγού.

2.6 Συνέπειες Αστοχιών

Οι πιθανές συνέπειες ατυχημάτων σε αγωγούς πρέπει να καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια του ανθρώπου, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις οικονομικές απώλειες.

2.6.1 Ανθρώπινη Ασφάλεια

Οι συνέπειες μιας αστοχίας ενός αγωγού στην ανθρώπινη ασφάλεια θα πρέπει να καθοριστούν τόσο σε σχέση με το προσωπικό που συμμετέχει στις εργασίες κατασκευής και λειτουργίας, όσο και με τον πληθυσμό των ανθρώπων που θα μπορούσαν να επηρεαστούν από τις δραστηριότητες της εταιρείας. Συνήθως υπάρχει πολύ μικρή ανθρώπινη

δραστηριότητα στην περιοχή των υποθαλάσσιων αγωγών. Διαρροή αγωγού κοντά στη πλατφόρμα ή κοντά σε κάποιο υποθαλάσσιο τεχνικό έργο μπορεί να έχει άμεσες συνέπειες στο προσωπικό του έργου. Διαρροές στη διαδρομή του αγωγού, μπορούν επίσης να θέσουν σε κίνδυνο το προσωπικό. Συνήθως βλάβες μεγάλης διαρροής (δηλαδή της κατηγορίας R2) από αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο το προσωπικό ή/και άλλους.

Ένα σύννεφο αερίου κοντά στην πλατφόρμα ή την εξέδρα εξόρυξης μπορεί να αναφλεγεί με αποτέλεσμα τη δημιουργία πυρκαγιάς ή/και έκρηξης. Ανάφλεξη θα συμβεί μόνο αν το αέριο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας είναι εύφλεκτης συγκέντρωσης και υπάρχουν κοντά πιθανές πηγές ανάφλεξης. Το μέγεθος και η κατανομή του νέφους αερίου που θα προκύψει από τη διαρροή του υποθαλάσσιου αγωγού θα επηρεαστεί από το βάθος, τα ρεύματα και τους ανέμους που επικρατούν.

Επιπλέον, η σύνθεση του αερίου θα επηρεάσει το σχηματισμό του νέφους. Για παράδειγμα, ένα αέριο πλούσιο σε υδρογονάνθρακες μπορεί να σχηματίσει ένα σύννεφο που να μην ανεβαίνει αλλά να εκτείνεται σε μια μεγάλη περιοχή, ενώ ένα ξηρό αέριο θα ανέβει στην επιφάνεια γρήγορα. Η πρόβλεψη της ακρίβειας για την εξέλιξη αυτών των γεγονότων είναι συχνά δύσκολη, αν και είναι κρίσιμη σε ζώνες με υψηλές πιθανότητες βλαβών. Μπορεί να θεωρηθεί πως στο 1-10% των περιπτώσεων εμφάνισης μεγάλων διαρροών, το απελευθερωμένο φυσικό αέριο θα αναφλεγεί και ένας μεγάλος αριθμός ατόμων στο σκάφος ή την πλατφόρμα εξόρυξης θα εκτεθεί. (DNV-RP-F107, 2010). Οι συνέπειες για την ανθρώπινη ασφάλεια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 2.3.

Κατηγορία	Περιγραφή
1 (χαμηλή)	Μηδενικός αριθμός τραυματισμών
2	(Δεν συνηθίζεται)
3 (μέση)	Σοβαροί τραυματισμοί, ένας θάνατος (εργατικό ατύχημα)
4	(Δεν συνηθίζεται)
5 (υψηλή)	Περισσότεροι από έναν θάνατοι (ανάφλεξη αερίου)

Πίνακας 2.3: Κατάταξη επιπτώσεων βλαβών στην ανθρώπινη ασφάλεια (DNV-RP-F107, 2010).

2.6.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Πρέπει να θεσπιστούν περιβαλλοντικές συνέπειες τόσο για μικρής όσο και για μεγάλης σημασίας σενάρια διαρροής (δηλαδή R1 και R2). Οποιαδήποτε διαρροή από κατεστραμμένο αγωγό θα πρέπει να εξεταστεί για ρυπογόνες επιπτώσεις ως προς:

- Το οικοσύστημα στο νερό, συμπεριλαμβανομένης της βλάστησης του βυθού, το πλαγκτόν, τα ψάρια και τα θαλάσσια θηλαστικά, όπως οι φάλαινες και οι φώκιες.
- Το παράκτιο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των παραλιών και των παράκτιων περιοχών που είτε έχουν μεγάλη αξία ως καταφύγιο για τα πουλιά ή έχουν σπάνια βλάστηση.
- Τα θαλάσσια πτηνά, συμπεριλαμβάνοντας τη διαβίωση, τη σύζευξη ή τη διέλευση τους από την περιοχή.
- Τα ψάρια, τις ιχθυοκαλλιέργειες και τις συναφείς βιομηχανίες στην περιοχή. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα παραπάνω εξαρτώνται από την ποσότητα και το είδος της διαρροής.
- Τις καιρικές συνθήκες, τα ύψη κυμάτων και τον ανέμο
- Το χρόνο που θα κάνει η διαρροή να φτάσει σε ευαίσθητες περιοχές και το μέγεθος της ρύπανσης.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνήθως εκφράζονται ως ο εκτιμώμενος χρόνος που θα απαιτηθεί για να επιτευχθεί η πλήρης αποκατάσταση των πληγέντων πληθυσμών / περιοχών. Αυτό θα περιλαμβάνει την αξιολόγηση της τρωτότητας των διαφόρων ειδών σε διαρροή του πετρελαίου, την αποτελεσματικότητα των μέτρων ετοιμότητας για διαρροή πετρελαίου ή φυσικού αερίου, κ.λπ.

Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών μιας εκτεταμένης διαρροής, είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα. Μια γενική αξιολόγηση μπορεί να γίνει με τη σύγκριση της πιθανής διαρροής με την ετήσια επιτρεπόμενη ποσότητα διαρροής, σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Έτσι υπολογίζονται έμμεσα οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατηγοριοποίηση των ποσοτήτων που δίνεται στον Πίνακα 2.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για μια τέτοιου είδους αποτίμηση.

Κατηγορία	Περιγραφή	Ποσό Απελευθέρωσης
1 (χαμηλή)	Καμία, μικρή ή ασήμαντη για το περιβάλλον. Είτε λόγω μη απελευθέρωσης είτε λόγω ασήμαντης απελευθέρωσης.	~0
2	Ελάχιστη απελευθέρωση ρυπογόνου μέσου, το οποίο θα αποσυντεθεί ή θα εξουδετερωθεί γρήγορα από τον αέρα ή το θαλάσσιο νερό.	<1000 τόνους
3 (μέση)	Μέτρια απελευθέρωση ρυπογόνου μέσου, το οποίο θα χρειαστεί λίγο χρόνο για να αποσυντεθεί ή να εξουδετερωθεί από τον αέρα ή το θαλάσσιο νερό ή μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί.	<10000 τόνους
4	Μεγάλη απελευθέρωση ρυπογόνου μέσου, το οποίο μπορεί να απομακρυνθεί ή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα αποσυντεθεί ή εξουδετερωθεί από τον αέρα ή το θαλασσινό νερό.	<100000 τόνους
5 (υψηλή)	Μεγάλη απελευθέρωση έντονα ρυπογόνου μέσου, το οποίο δεν μπορεί να απομακρυνθεί και θα χρειαστεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να αποσυντεθεί ή να εξουδετερωθεί από τον αέρα ή το θαλασσινό νερό.	>100000 τόνους

Πίνακας 2.4: Κατηγοριοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων(DNV-RP-F107, 2010).

2.6.3 Οικονομικές Απώλειες

Οι οικονομικές συνέπειες οποιαδήποτε ζημιάς σε έναν μεγάλο αγωγό μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με την επιβράδυνση της παραγωγής ενός αγωγού. Το κόστος της καθυστέρησης της παραγωγής κατά κανόνα υπερβαίνει το πραγματικό κόστος της αποκατάστασης των ζημιών. Ωστόσο, τόσο το κόστος της επισκευής όσο και το κόστος οποιασδήποτε καθυστέρησης στην παραγωγή πρέπει να συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση.

Οι οικονομικές συνέπειες μπορεί να ταξινομηθούν όπως αναφέρεται στον Πίνακα 2.5. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές μεταξύ των αγωγών μπορούν να τροποποιήσουν τα αναφερόμενα όρια. Εναλλακτικά, το πραγματικό κόστος της καθυστέρησης της παραγωγής και το κόστος της επισκευής μπορεί να χρησιμοποιηθούν στις αξιολογήσεις κόστους-οφέλους του προτεινόμενου σχεδιασμού των μέτρων προστασίας. Σε γενικές γραμμές, η επισκευή υποθαλάσσιων αγωγών είναι μια δύσκολη, ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία. Η ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης του έργου θα διαρκέσει αρκετούς μήνες, καθώς όλες οι εργασίες εκτελούνται υποθαλάσσια. Η πραγματική διάρκεια, ωστόσο, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον χρόνο κινητοποίησης, από την απόδοση των συστημάτων επισκευής και από τις καιρικές συνθήκες.

Κατηγορία	Περιγραφή	Καθυστέρηση της παραγωγής / Χρόνος αργίας
1 (χαμηλή)	Ασήμαντες επιπτώσεις στη λειτουργία με μικρό ή ασήμαντο κόστος επισκευής.	0 μέρες
2	Αστοχίες των οποίων η επισκευή μπορεί να αναβληθεί μέχρι τον προγραμματισμένο τερματισμό του έργου και θα υπάρξει κάποιο κόστος επισκευής.	<1 μέρες
3 (μέση)	Απρογραμμάτιστη απώλεια της εγκατάστασης ή του συστήματος με σημαντικό κόστος επισκευής. Η επισκευή απαιτεί έκτακτες υποβρύχιες εργασίες.	1-3 μήνες
4	Αστοχίες που προκαλούν επ' αόριστον κλείσιμο του αγωγού με σημαντικό κόστος. Η επισκευή απαιτεί έκτακτες υποβρύχιες επιχειρήσεις. Ή αστοχίες που έχουν σαν αποτέλεσμα κλείσιμο μεγάλων τμημάτων του αγωγού (ή του συνόλου του), για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα.	3-12 μήνες
5 (υψηλή)	Ολική απώλεια του αγωγού και πιθανή απώλεια και άλλων δομικών τμημάτων της πλατφόρμας. Μεγάλο κόστος επισκευής και μεγάλο χρονικό διάστημα διακοπής της παραγωγής. Ή αστοχίες με αποτέλεσμα το κλείσιμο του συνολικού δικτύου για μεγαλύτερο διάστημα.	1-3 χρόνια

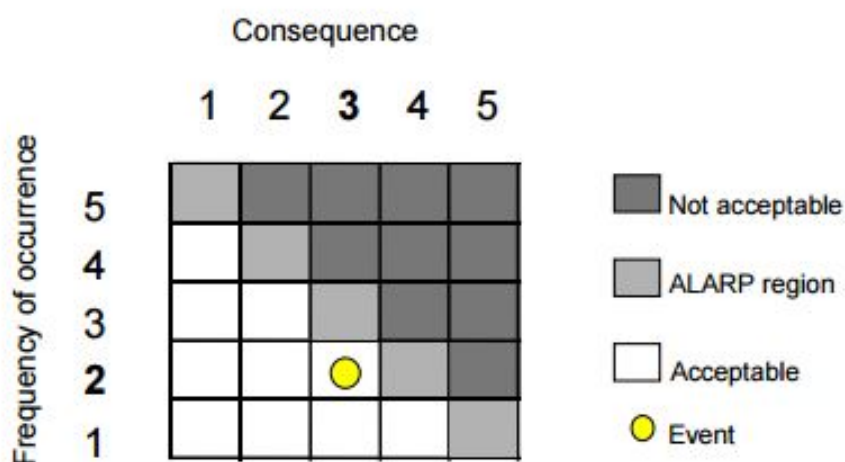
Πίνακας 2.5 : Κατηγοριοποίηση οικονομικών επιπτώσεων

2.7 Εκτίμηση κινδύνου

Η τελική αξιολόγηση του κινδύνου αποτελείται από τη σύζευξη της σχετικής κατάταξης της συχνότητας του κινδύνου με την κατάταξη των επιπτώσεων και στη συνέχεια, την αποτίμηση του αποτελέσματος βάση προκαθορισμένων κριτηρίων. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει ένα

παράδειγμα, όπου οι σκοτεινές σκιασμένες περιοχές δείχνουν τα καθορισμένα συνολικά κριτήρια, για τα οποία απαιτείται πρόσθετη προστασία. Εάν το επίπεδο επικινδυνότητας δεν είναι αποδεκτό, τότε θα πρέπει να ληφθούν μέτρα μετριασμού για τη μείωση του κινδύνου ή/και μέτρα προστασίας του αγωγού. Το μήκος του αγωγού που πρόκειται να προστατευθεί πρέπει να είναι τόσο ώστε ο συνολικός κίνδυνος τόσο του προστατευόμενου όσο και του μη προστατευόμενου τμήματος να είναι αποδεκτός. Πρέπει να καθοριστούν πίνακες κινδύνου για κάθε εντοπισμένη επικίνδυνη κατάσταση (γεωκίνδυνοι, κίνδυνοι από ανθρώπινη δραστηριότητα, κλπ), αλλά και κάθε σχετική θέση (δηλαδή στη διαδρομή του αγωγού, κοντά στην πλατφόρμα ή κοντά σε υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις)

Κάθε συνέπεια (ανθρώπινη ασφάλεια, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οικονομικές απώλειες). Συνήθως, η σημαντικότερη από τις επικίνδυνες καταστάσεις θα υπαγορεύσει τις απαιτήσεις προστασίας. Αν διάφοροι παράγοντες δώσουν υψηλό κίνδυνο, στη συνέχεια, τυχόν σωρευτικά αποτελέσματα, δηλαδή η εξάρτηση μεταξύ των γεγονότων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη έτσι ώστε το συνολικό επίπεδο κινδύνου να είναι αποδεκτό. Εναλλακτικά, το κριτήριο αποδοχής μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να αντιπροσωπεύει τέτοια αποτελέσματα. Το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί όταν γίνεται διαχωρισμός των επικίνδυνων καταστάσεων σε πολλά μεμονωμένα γεγονότα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να συμβαδίζουν με τα αποδεκτά επίπεδα κινδύνου για μεμονωμένα γεγονότα, όμως η συσσωρευτική επικινδυνότητα τους θα μπορούσε να είναι μη αποδεκτή (DNV-RP-F107, 2010).



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα της σύνδεσης σεναρίου κινδύνου με αποδεκτό επίπεδο επιπτώσεων (DNV-RP-F107, 2010).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Υποθαλάσσιων Αγωγών

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια παρουσίαση των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών των υποθαλάσσιων αγωγών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται κάποιες βασικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό των υποθαλάσσιων αγωγών με βάση τα μηχανικά και γεωμετρικά στοιχεία του, τις συνθήκες του περιβάλλοντος και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Κρίνεται σημαντικό να γίνει αναφορά στη θεωρία στην οποία βασίζεται η επιλογή των κριτηρίων σχεδιασμού ενός υποθαλάσσιου αγωγού πριν από την ανάλυση του αγωγού που υπόκειται σε καταπόνηση λόγω κατολίσθησεων, που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

3.1 Υλικό κατασκευής

Συνήθη υλικά κατασκευής υποθαλάσσιων αγωγών είναι το άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα και ακόμη περισσότερο το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ο χάλυβας, το μη πλαστικοποιημένο χλωριούχο πολυβινύλιο (uPVC) και το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες υάλου (GRP) και τα συναφή προς αυτό (FRP, GRE, κ.λπ.). Το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται στα προσωμοιώματα της παρούσας εργασίας είναι ο χάλυβας αντοχής X65, όμως εξετάζονται και οι χάλυβες αντοχής X56 και X60.

Το εύρος των εξωτερικών διαμέτρων των χαλύβδινων αγωγών κυμαίνεται από 0.460 m ως 2.337 m, τα δε πάχη τοιχώματος από 0.0064m ως 0.0317m. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι ο χάλυβας διαβρώνεται όταν βρίσκεται σε θαλάσσιο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτόν, συνήθως εφαρμόζεται αντιδιαβρωτική προστασία στην εξωτερική επιφάνεια, από λιθανθρακόπισσα με υαλονήματα, ασφατικές βαφές, εποξειδικές ρητίνες, κ.λπ. Εσωτερικά, οι χαλύβδini αγωγοί συνήθως επενδύονται με λιθανθρακόπισσα ή άλλα πιο σύγχρονα υλικά (εποξειδικά, PVC, κ.λπ.). Η επένδυση χαλύβδινων αγωγών με σκυρόδεμα λόγω του μεγάλου βάρους είναι η καλύτερη λύση όσον αφορά την ευστάθειά τους. Εάν υπάρξει ρευστοποίηση του εδάφους θεμελίωσης, τότε, σε περίπτωση που έχουν προβλεφθεί μεμονωμένα έρματα,

ενδέχεται αυτά να παρασυρθούν από το παχύρρευστο υλικό, ενώ εάν υπάρχει συνεχές έρμα από σκυρόδεμα ομοιόμορφα καθ' όλο το μήκος του χαλύβδινου αγωγού, τότε τα δυσμενή αποτελέσματα μετριάζονται. Γι' αυτό πρέπει όσο επιτρέπεται (π.χ., από το κόστος) να επιδιώκεται η επένδυση των χαλύβδινων αγωγών με σκυρόδεμα επάνω από την αντιδιαβρωτική προστασία για μεγαλύτερη διασφάλιση της ακεραιότητας τους υπό οποιεσδήποτε συνθήκες.

Η σύνδεση των χαλύβδινων τμημάτων ενός αγωγού γίνεται συνήθως με ηλεκτροσυγκόλληση, αν και χρησιμοποιούνται και ενώσεις, με ειδικές φλάτζες ή άλλα εξαρτήματα. Η αντοχή των ενώσεων με ηλεκτροσυγκόλληση πρέπει να είναι τουλάχιστον αντίστοιχη αυτής του αγωγού. Επίσης, πρέπει να αποκατασταθεί η αντιδιαβρωτική προστασία γύρω από τις ενώσεις, εσωτερικά και εξωτερικά στον αγωγό, και η επικάλυψη από σκυρόδεμα. Γενικά, τα κριτήρια επιλογής του υλικού κατασκευής του αγωγού είναι τα εξής:

- ✓ Η κάλυψη των αναγκών λειτουργίας.
- ✓ Η διαθεσιμότητα των υλικών και τις γεωμετρίας που έχουν προκύψει από τους υπολογισμούς
- ✓ Το κόστος
- ✓ Η χημική σύνθεση των υδρογονανθράκων.
- ✓ Η ευκολία κατασκευής και τοποθέτησης στον πυθμένα.
- ✓ Το έδαφος, όπου με βάση τη γωνία τριβής αγωγού-εδάφους εκτιμούμε τις συνθήκες αλληλεπίδρασης.
- ✓ Η παρακολούθηση και η συντήρηση.

3.2 Διαστάσεις διατομής

Οι υδραυλικοί υπολογισμοί καθορίζουν τη διάμετρο του υποθαλάσσιου αγωγού με βασικό κριτήριο ελέγχου τον εξής περιορισμό: οι εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις πρέπει να δίνουν τάσεις και παραμορφώσεις μικρότερες των επιτρεπόμενων. Από αυτόν τον περιορισμό προσδιορίζεται το πάχος του τοιχώματος του αγωγού. Επίσης, σημαντικοί, και καθοριστικοί πολλές φορές, είναι οι έλεγχοι που αφορούν την κατάσταση του αγωγού, κατά τη φάση λειτουργίας, σε συνθήκες εξωτερικής φόρτισης (π.χ., επιχώσεις, απώλεια στήριξης), όπως και κατά τη φάση της κατασκευής (π.χ., έλξη, στοίβαση, πόντιση). Στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόζονται οι κλασσικές αρχές της μηχανικής και της εδαφομηχανικής.

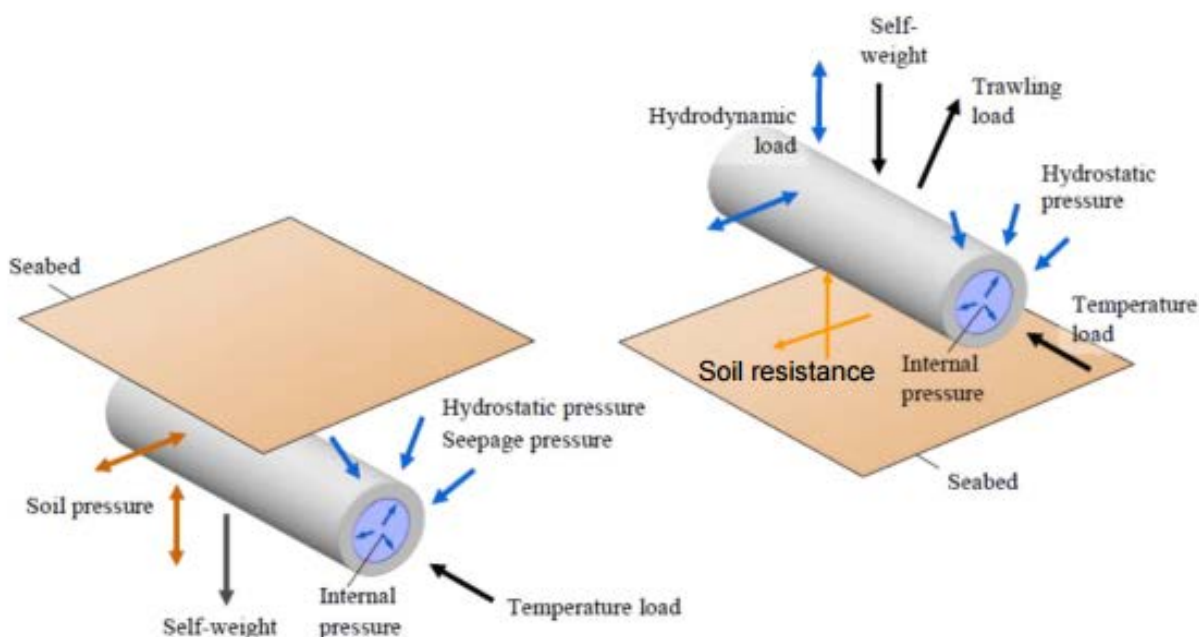
3.3 Στατικές φορτίσεις

Ένας υποθαλάσσιος αγωγός πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι σε θέση να αντέχει φορτία που του επιβάλλονται τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη λειτουργία του. Κατά την κατασκευή υφίσταται κάμψη, έλξη και στρέψη. Όσον αφορά στη φάση λειτουργίας, ο αγωγός φορτίζεται λόγω της εσωτερικής πίεσης που ασκεί το υγρό ή το αέριο που μεταφέρει, της εξωτερικής υδατικής πίεσης και λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται από θερμοκρασιακές μεταβολές. Συνοπτικά οι κύριες φορτίσεις που δέχεται ο αγωγός παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 και είναι οι εξής:

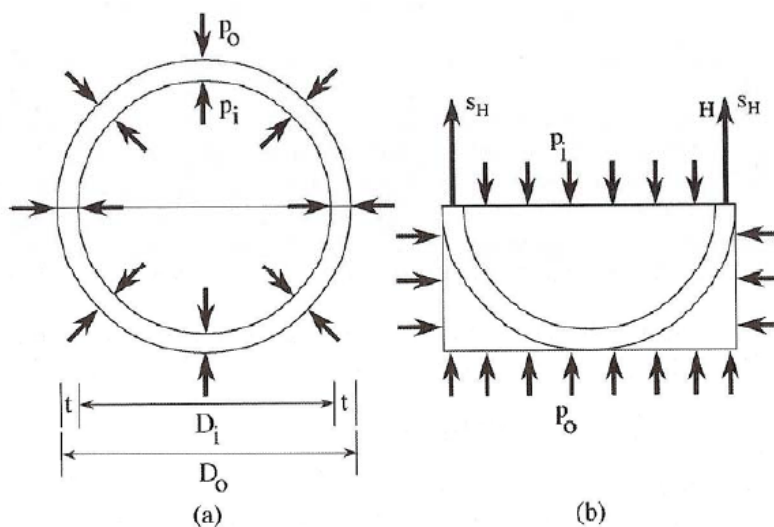
1. Βάρος αγωγού (στατική φόρτιση) συμπεριλαμβανομένου του ρευστού που υπάρχει μέσα στον αγωγό.
2. Φόρτιση λόγω θερμοκρασίας: στατική αξονική φόρτιση λόγω ύπαρξης διαφορετικών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια λειτουργίας μεταξύ του ρευστού που μεταφέρει ο αγωγός και του θαλασσινού νερού και αδυναμία διαστολής λόγω μεγάλου μήκους του αγωγού (φόρτιση με σημαντικό μέγεθος).
3. Φόρτιση λόγω εσωτερικών πιέσεων στο εσωτερικό του αγωγού κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.
4. Κυματικές φορτίσεις: φορτίσεις λόγω κύματος και ρεύματος στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση.
5. Φορτίσεις λόγω πρόσκρουσης άγκυρας ή αλιείας βυθού.
6. Αντίσταση εδάφους: δύναμη τριβής (οριζόντια) και κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης σε περίπτωση επαφής με τον πυθμένα.
7. Υδατικές πιέσεις (seepage pressure).

3.3.1 Σχεδιασμός αντοχής έναντι εσωτερικής πίεσης

Η εσωτερική πίεση από το περιεχόμενο ρευστό είναι μια σημαντική φόρτιση, στην οποία ο αγωγός πρέπει να ανταπεξέλθει. Η περιμετρική τάση στον αγωγό μπορεί να υπολογιστεί από την ισορροπία όλων των δυνάμεων. Για παράδειγμα, για έναν αγωγό με εξωτερική διάμετρο D_o , εσωτερική διάμετρο D_i , πάχος τοιχώματος t , εσωτερική πίεση p_i και εξωτερική πίεση p_o προκύπτει η διατομή του Σχήματος 3.2(a).



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση φορτίσεων που δέχεται ένας υποθαλάσσιος αγωγός (Λουκογεωργάκη, 2014) .



Σχήμα 3.2: Περιμετρική τάση σε αγωγό υπό εσωτερική και εξωτερική πίεση (Ζερβού, 2008).

Η ισορροπία λαμβάνεται για όλες τις τάσεις, όπως αυτές εικονίζονται στο ορθογώνιο του Σχήματος 3.2(a). Το ορθογώνιο ορίζεται από τη διάμετρο, δύο εφαπτόμενες στα σημεία όπου η διάμετρος τέμνει την εξωτερική επιφάνεια και μια εφαπτομένη παράλληλη προς τη διάμετρο. Στο Σχήμα 3.2(b) φαίνονται, επίσης, και οι συνιστώσες της τάσης που δρουν κατά μήκος των ορίων των διαφόρων τμημάτων του ορθογωνίου. Ως (s_H) ορίζεται η περιμετρική

τάση (hoop stress). Η συνισταμένη κατά την κατακόρυφη διεύθυνση πρέπει να είναι μηδενική, οπότε, ανά μονάδα μήκους προκύπτει:

$$0 = 2s_H t - p_i D_i + p_0 D_0 \quad (3.1)$$

Η Εξίσωση (3.1), επιλυόμενη ως προς (s_H) δίνει:

$$s_H = \frac{p_i D_i - p_0 D_0}{2t} \quad (3.2)$$

Η προηγούμενη σχέση δίνει τη μέση επιτρεπόμενη τάση, ανεξαρτήτως από το λόγο διαμέτρου/πάχους τοιχώματος (D/t) του αγωγού. Μολονότι ο σχεδιασμός των αγωγών για την περιμετρική τάση μπορεί να βασιστεί στην Εξίσωση (3.2), συνήθως χρησιμοποιούνται διάφορες άλλες εκδοχές της. Η απλούστερη και πιο κοινώς χρησιμοποιούμενη εκδοχή είναι ο τύπος του Barlow που σχετίζει την εσωτερική πίεση του αγωγού με τις διαστάσεις και την αντοχή του υλικού του:

$$P = \frac{2St}{D} \quad (3.3)$$

όπου, p η εσωτερική πίεση του αγωγού, S , η επιτρεπόμενη τάση, t , το πάχος του τοιχώματος και D η εξωτερική διάμετρος. Η σχέση αυτή προκύπτει βάσει της Εξίσωσης (3.2) αμελώντας τον όρο της εξωτερικής πίεσης, ($p_0 D_0$). Ως D λαμβάνεται η εξωτερική διάμετρος, η οποία είναι προφανώς μεγαλύτερη από την εσωτερική. Συγκρίνοντας τις Εξισώσεις (3.2) και (3.3), προκύπτει ότι η δεύτερη είναι πιο συντηρητική δεδομένου ότι δίνει υψηλότερη περιμετρική τάση για την ίδια εσωτερική πίεση. Ο κανονισμός Det norske Veritas (DNV 1996) απαιτεί ο μελετητής να χρησιμοποιήσει τον ακόλουθο τύπο:

$$s_H = (p_i - p_0) \frac{D_0 - t}{2t} \quad (3.4)$$

όπου, t είναι το ελάχιστο πάχος τοιχώματος, όπως αυτό προκύπτει από την κατασκευαστική ανοχή και τη διάβρωση κατά τη λειτουργία.

Οι Εξισώσεις (3.2), (3.3) και (3.4) προκύπτουν μόνο από στατική ανάλυση. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η διεξαγωγή πλήρους ανάλυσης, χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ελαστικότητας, εφαρμόζοντας τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων, επιβάλλοντας την απαίτηση συμβιβαστού των παραμορφώσεων και θεωρώντας ότι η περιμετρική τάση δεν είναι ομοιόμορφη. Αυτή η ανάλυση οδηγεί στον τύπο του Lamé για τη μέγιστη περιμετρική τάση, η οποία λαμβάνει χώρα στην εσωτερική επιφάνεια του αγωγού, και είναι:

$$s_H = (p_i - p_0) \frac{D_0^2 + D_i^2}{D_0^2 - D_i^2} - p_0 \quad (3.5)$$

Με χρήση του τύπου αυτού μπορεί να γίνει ακριβής υπολογισμός της μέγιστης τάσης, θεωρώντας όμως ότι ο αγωγός παραμένει ελαστικός. Η τάση που υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.5) είναι πάντα ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη της Εξίσωσης (3.2), αλλά μικρότερη από εκείνη της Εξίσωσης (3.3). Η διαφορά αυξάνεται όσο μειώνεται ο λόγος D/t , ενώ η μεταβλητή D λαμβάνει τιμή που αντιστοιχεί στην εξωτερική διάμετρο του αγωγού. Καθένας από τους παραπάνω τύπους μπορεί να ξαναγραφεί ως μία σχέση σχεδιασμού για το ονομαστικό πάχος τοιχώματος που απαιτείται προκειμένου η περιμετρική τάση να μην ξεπερνάει ένα ορισμένο ποσοστό της τάσης διαρροής Y :

$$s_H \leq f_1 Y$$

όπου f_1 είναι ένας συντελεστής σχεδιασμού. Συνδυάζοντας τον τύπο του Barlow, την Εξίσωση (3.3), με την Εξίσωση (3.5), προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{D \cdot p_i}{2 \cdot t} = s_H \leq f_1 \cdot Y \quad (3.6)$$

Αυτή μπορεί να ξαναγραφεί ως μία σχέση υπολογισμού του ελάχιστου πάχους τοιχώματος που ικανοποιεί την Εξίσωση (3.6):

$$t \geq \frac{p_i \cdot D}{2 \cdot f_1 \cdot Y} \quad (3.7)$$

Είναι συχνά χρήσιμο να προστεθεί ένας δεύτερος συντελεστής (f_2) κατασκευαστικής ανοχής, με τον οποίο θα επιτρέπεται διαφοροποίηση του πραγματικού ελάχιστου πάχους τοιχώματος από το ονομαστικό. Ενσωματώνοντας και αυτόν το συντελεστή, η Ανίσωση (3.7) μετατρέπεται σε ένα τύπο για τον υπολογισμό του ελάχιστου πάχους τοιχώματος:

$$t \geq \frac{p_i \cdot D}{2 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot Y} \quad (3.8)$$

Οι κανονισμοί, οι οποίοι επιβάλλουν ένα όριο της περιμετρικής τάσης, καθορίζουν μία μέγιστη τιμή του συντελεστή σχεδιασμού. Στο παρελθόν, ο συντελεστής σχεδιασμού λαμβανόταν σχεδόν πάντα ίσος με 0.72 για τους υποθαλάσσιους αγωγούς. Ορισμένοι κανονισμοί χρησιμοποιούν ακόμη αυτή την τιμή. Ωστόσο, έχει γίνει αντιληπτό ότι η εν λόγω τιμή είχε επιλεγεί περισσότερο από εξήντα χρόνια πριν και ξαναχρησιμοποιείται στους νεότερους κανονισμούς χωρίς ιδιαίτερη διερεύνηση. Εξάλλου, αντανάκλα την πρακτική μιας περιόδου κατά την οποία τα πρότυπα παραγωγής αγωγών, συγκόλλησης και κατασκευής ήταν κατά πολύ κατώτερα από τα σημερινά. Πρόσφατη έρευνα έχει δείξει ότι ο συντελεστής μπορεί να αυξηθεί, χωρίς αυτό να επηρεάζει την ασφάλεια των αγωγών. Για παράδειγμα,

στον κανονισμό του Καναδά (1994), η τιμή 0.72 του συντελεστή αντικαταστάθηκε με 0.80. Ο κανονισμός DNV (1996), επιβάλλει δύο συνθήκες:

- i. αυτή που θέτει το όριο της περιμετρικής τάσης σε μία τιμή πολλαπλάσια, κατά η_s , της καθορισμένης ελάχιστης τάσης διαρροής Y , και
- ii. αυτή που θέτει το όριο της περιμετρικής τάσης σε μία τιμή πολλαπλάσια, κατά η_u , της καθορισμένης οριακής εφελκυστικής αντοχής T .

Ο συντελεστής η_s αντικαθιστά τον συντελεστή f_1 και εξαρτάται από το επίπεδο ασφαλείας (DNV, 1996). Για χαμηλό επίπεδο ασφαλείας, ο εν λόγω συντελεστής είναι ίσος με 0.83. Για κανονικό και υψηλό επίπεδο ασφαλείας, ο συντελεστής σχεδιασμού ισούται με 0.77. Ο συντελεστής η_u , ισούται με 0.72 για χαμηλό επίπεδο ασφαλείας, 0.67 για κανονικό επίπεδο ασφαλείας και 0.64 για υψηλό επίπεδο ασφαλείας. Συνδυάζοντας την Εξίσωση (3.4) με την πρώτη από αυτές τις συνθήκες, προκύπτει:

$$t \geq \frac{D}{\frac{2 \cdot \eta_i \cdot Y}{p_i - p_0}} + 1 \quad (3.9)$$

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του Lamé (3.5) ως βάση για τον σχεδιασμό. Ο ελάχιστος επιτρεπόμενος λόγος πάχους τοιχώματος προς εξωτερική διάμετρο (t/D_o), για τη μέγιστη περιμετρική τάση, προκειμένου να μη γίνει υπέρβαση της ποσότητας ($f_1 Y$) δίνεται από την εξίσωση:

$$0 = \left(\frac{t}{D_o} \right) - \left(\frac{t}{D_0} \right) + \frac{1}{\beta} \quad (3.10)$$

όπου:

$$\beta = 2 \cdot \left(1 + \frac{f_1 \cdot Y + p_0}{p_i - p_o} \right) \quad (3.11)$$

Η λύση της Εξίσωσης (3.11) είναι:

$$t = \frac{1}{2} \cdot D_o \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4}{\beta}} \right) \quad (3.12)$$

Στους νεότερους κανονισμούς DNV 2000, απαιτείται ότι η διαφορά μεταξύ της αναπτυσσόμενης τοπικής πίεσης p_{li} και της εξωτερικής πίεσης p_e πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$p_n - p_c \leq \frac{p_b \cdot t}{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m} \quad (3.13)$$

όπου, γ_{sc} ο μειωτικός συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος λαμβάνεται 1.046 για χαμηλό επίπεδο ασφαλείας, 1.138 για κανονικό επίπεδο ασφαλείας και 1.308 για υψηλό επίπεδο ασφαλείας, γ_m ο συντελεστής αντίστασης του υλικού, ο οποίος ισούται με 1.15 για τις οριακές καταστάσεις λειτουργίας, αντοχής και ατυχήματος και 1.00 για την οριακή κατάσταση κόπωσης και p_b η πίεση, η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$p_b = \min \left\{ \frac{2 \cdot t}{D-t} \cdot f_y \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}, \frac{2 \cdot t}{D-t} \cdot \frac{f_u}{1,15} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \right\} \quad (3.14)$$

όπου ο πρώτος όρος σχετίζεται με την οριακή κατάσταση διαρροής και ο δεύτερος με την οριακή κατάσταση θραύσης, ενώ:

- ✓ t : είναι το πάχος του τοιχώματος, λαμβάνοντας υπόψη την κατασκευαστική ανοχή και τη διάβρωση κατά την φάση λειτουργίας.
- ✓ f_y : είναι η χαρακτηριστική αντοχή διαρροής, η οποία είναι η καθορισμένη ελάχιστη τάση διαρροής, απομειωμένη (εάν είναι απαραίτητο) λόγω αυξημένης θερμοκρασίας, και πολλαπλασιασμένη με ένα συντελεστή αντοχής υλικού, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες των ιδιοτήτων.
- ✓ f_u : είναι η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή, η οποία είναι η καθορισμένη ελάχιστη εφελκυστική τάση, απομειωμένη (εάν είναι απαραίτητο) λόγω αυξημένης θερμοκρασίας, και πολλαπλασιασμένη με ένα συντελεστή αντοχής υλικού, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες των ιδιοτήτων.

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (3.14) και (3.15), το ελάχιστο πάχος τοιχώματος προκύπτει ως εξής:

$$t = \frac{D}{1 + \frac{2}{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m \cdot (p_h - p_e)} \cdot \min \left\{ f_y, \frac{f_u}{1,15} \right\} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}} \quad (3.15)$$

3.3.2 Υπολογισμός αντοχής έναντι εξωτερικής πίεσης

Η άσκηση μεγάλης εξωτερικής πίεσης τείνει να δώσει στον αγωγό ένα ελλειπτικό σχήμα και να προκαλέσει εν τέλει την αστοχία του. Ένας τελείως κυκλικός αγωγός, ο οποίος φορτίζεται από μια σταθερά αυξανόμενη εσωτερική πίεση, θα παρέμενε κυκλικός μέχρι η πίεση να λάβει την κρίσιμη ελαστική τιμή της και στη συνέχεια θα αστοχήσει. Η κρίσιμη ελαστική τιμή της πίεσης δίνεται από τη σχέση:

$$p_{ecr} = \frac{E}{4 \cdot \left(\frac{R}{t}\right)^3 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (3.16)$$

όπου, R η μέση ακτίνα (μετρημένη από το κέντρο ως το μέσο του τοιχώματος), t το πάχος του τοιχώματος, E το μέτρο ελαστικότητας και ν ο λόγος Poisson.

Στην πραγματικότητα, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί δεν είναι τελείως κυκλικοί, αλλά ελαφρώς αποκλίνουν από το κυκλικό σχήμα. Όταν ένας τέτοιος αγωγός υπόκειται σε εξωτερική πίεση, η έκταση της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα σταδιακά αυξάνεται και γίνεται εξαιρετικά μεγάλη όταν η πίεση πλησιάζει την κρίσιμη τιμή της Εξίσωσης (3.17). Μια απλή ανάλυση αντιμετωπίζει την απόκλιση της διατομής από το κυκλικό σχήμα ως ημιτονοειδώς κατανομημένη γύρω από την περιφέρεια και τον αγωγό ως ένα κέλυφος με λεπτό τοίχωμα. Η τιμή της πίεσης (p), στην οποία ξεκινάει η διαρροή του αγωγού προκύπτει από τη λύση της Εξίσωσης (3.18):

$$p^2 - \left(p_r + \left(1 + 1,5 \cdot g \cdot \frac{R}{t} \right) \cdot p_{ecr} \right) \cdot p + p_r \cdot p_{ecr} = 0 \quad (3.17)$$

όπου:

$$p_r = \frac{Y \cdot t}{R} \quad (3.18)$$

η οποία είναι η πίεση στην οποία θα αστοχούσε ο αγωγός αν αρχικά ήταν τελείως κυκλικός και δεν υπήρχε κάποια ατέλεια.

Η Εξίσωση (3.18), παρόλο που έχει περιθώρια σφάλματος, δίνει μια σχετικά ρεαλιστική εκτίμηση της πίεσης αστοχίας. Βασίζεται στην παραδοχή ότι αρχικά στον αγωγό δεν εμφανίζεται καμία τάση. Αυτό είναι δυνατό, αλλά είναι πιο πιθανό ότι η αρχική απόκλιση από το κυκλικό σχήμα είναι αποτέλεσμα κάποιας ατέλειας κατά τη διαδικασία παραγωγής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια αρχική καμπτική ροπή στην περιφέρεια του αγωγού και ως εκ τούτου την ύπαρξη κάποιας τάσης. Η λύση της Εξίσωσης (3.19) δίνει το μέγιστο απαιτούμενο λόγο (D/t) προκειμένου ο αγωγός να αντέχει μια δεδομένη πίεση p :

$$\alpha^3 \cdot \beta \cdot \left(\frac{D}{t} \right)^5 - \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{D}{t} \right)^3 - \alpha \cdot (a + g) \cdot \left(\frac{D}{t} \right)^2 + 1 = 0 \quad (3.19)$$

$$\text{όπου: } \alpha = \frac{p}{2 \cdot Y}$$

$$\beta = \frac{Y \cdot (1 - \nu^2)}{E}$$

$$g = \frac{\text{μέγιστη διάμετρος} - \text{ελάχιστη διάμετρος}}{\text{μέση διάμετρος}}$$

Η επιλογή του πάχους του τοιχώματος είναι μία από τις πιο σημαντικές αποφάσεις κατά τον σχεδιασμό, καθώς αυτό έχει σημαντική επίδραση στο κόστος και την τεχνικά εφικτή

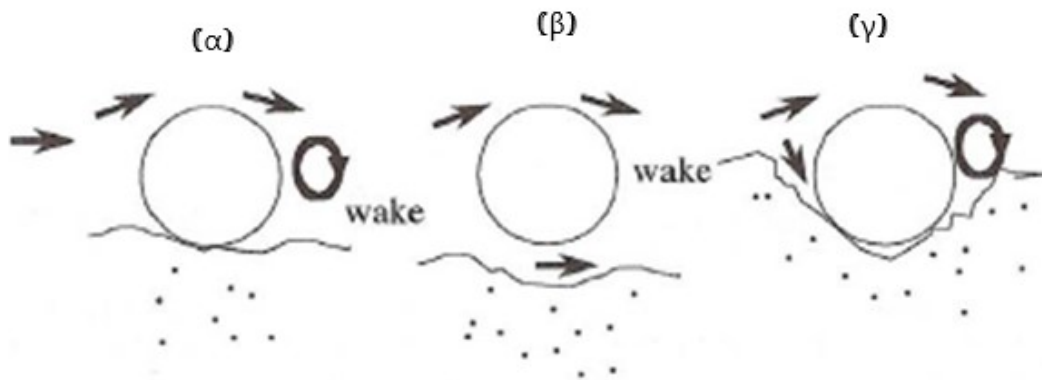
υλοποίηση ενός υποθαλάσσιου αγωγού σε μεγάλα βάθη, όπου η αστοχία λόγω εξωτερικής πίεσης είναι αυτή που καθορίζει την επιλογή του κατάλληλου πάχους τοιχώματος. Συνήθως, σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται μεγάλο πάχος τοιχώματος.

3.4 Δυναμικές φορτίσεις

Ένας υποθαλάσσιος αγωγός πρέπει να είναι σταθερά τοποθετημένος πάνω στον πυθμένα. Εάν είναι πολύ ελαφρύς, θα ολισθαίνει υπό τη δράση ρευμάτων και κυμάτων. Από την άλλη πλευρά, εάν είναι πολύ βαρύς, η κατασκευή του θα είναι πιο δύσκολη και με μεγαλύτερο κόστος. Ο μελετητής μπορεί να αυξήσει το βάρος του αγωγού προσθέτοντας ένα εξωτερικό περίβλημα σκυροδέματος. Αυτό, επίσης, μπορεί να συνεισφέρει και στη μηχανική προστασία του αντιδιαβρωτικού περιβλήματος. Εναλλακτικά, μπορεί να αυξήσει το βυθιζόμενο βάθος αυξάνοντας το πάχος του τοιχώματος του αγωγού, παρόλο που αυτή είναι μια σχετικά δαπανηρή επιλογή, ειδικά αν ο αγωγός είναι κατασκευασμένος από ειδικό αντιδιαβρωτικό κράμα. Εκτός από τα παραπάνω, ο μελετητής μπορεί να μειώσει τις υδροδυναμικές φορτίσεις και να αυξήσει τη σταθερότητα εγκιβωτίζοντας τον αγωγό σε τάφρο ή αυξάνοντας το βάρος προσθέτοντας έρματα.

3.4.1 Υδροδυναμική φόρτιση

Ένα ρεύμα με διεύθυνση κάθετη προς τον άξονα του αγωγού προκαλεί υδροδυναμική φόρτιση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3. Η περιοχή με την υψηλότερη πίεση βρίσκεται στο χαμηλότερο τμήμα της ανάντι πλευράς. Η ροή διαχωρίζεται σε μία θέση, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα. Η ροή είναι κάπως ασταθής στη ζώνη μίξης κατάντι του σημείου διαχωρισμού και δημιουργείται μια σειρά δινών. Στην κατάντι πλευρά αναπτύσσεται και μικρή υποπίεση. Εάν ο αγωγός βρίσκεται ελαφρώς πάνω από τον πυθμένα (Σχήμα 3.4(β)), η ροή τροποποιείται. Υπάρχει μια ροή υψηλής ταχύτητας κάτω από τον αγωγό, η οποία δημιουργείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ της ανάντι και της κατάντι πλευράς. Εάν το υλικό του πυθμένα είναι ιζήματα, η υψηλή ταχύτητα θα διαβρώσει τον πυθμένα και θα μεγαλώσει το κενό μεταξύ αγωγού-πυθμένα. Καθώς το κενό θα μεγαλώνει, η ταχύτητα θα μειώνεται μέχρι να επιτευχθεί ένα σταθερό βάθος. Εάν ο αγωγός βρίσκεται σε όρυγμα (Σχήμα 3.4(γ)), η ροή μπορεί να διαχωριστεί από το ανάντι άκρο και ο αγωγός να βρεθεί εν μέρει στο κενό που θα δημιουργηθεί στην άλλη πλευρά της τάφρου.



Σχήμα 3.3: Ροή ύδατος όταν ο αγωγός είναι τοποθετημένος (α) στον πυθμένα, (β) πάνω από τον πυθμένα, (γ) σε όρυγμα (Ζερβού, 2014).

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι διαφορές πίεσης γύρω από τον αγωγό προκαλούν υδροδυναμική φόρτιση. Η υδροδυναμική φόρτιση μπορεί να χωριστεί σε μία οριζόντια συνιστώσα κατά την κατάντι διεύθυνση (drag) και μία κατακόρυφη συνιστώσα, συνήθως προς τα πάνω (lift). Ακόμη και σε μία μόνιμη ροή, υπάρχουν μικρές αλλά μετρήσιμες διαφορές στη δύναμη λόγω μη μόνιμης ροής στη ζώνη τυρβώδους μίξης. Σε μία μη μόνιμη ροή, υπάρχουν πολύ μεγάλες διακυμάνσεις στη δύναμη, ιδιαίτερα στις αντιστροφές ροής. Σε περίπτωση μόνιμης ροής, η οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει του ρεύματος και των διαστάσεων του αγωγού ως εξής:

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot U^2 \quad (3.20)$$

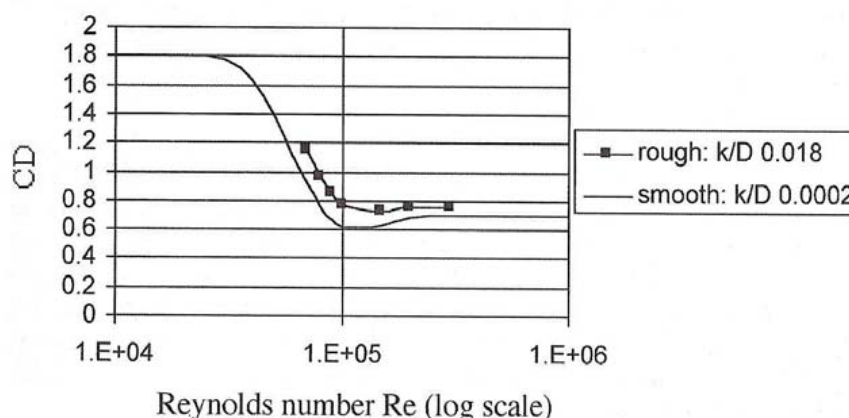
$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot D \cdot U^2 \quad (3.21)$$

όπου: F_x η οριζόντια δύναμη ανά μονάδα μήκους του αγωγού, F_y η κατακόρυφη δύναμη αναμονάδα μήκους του αγωγού, ρ η πυκνότητα του νερού, C_D ο συντελεστής έλξης και C_L ο συντελεστής ανύψωσης, D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού και U η ταχύτητα ρεύματος κάθετα προς τον άξονα του αγωγού.

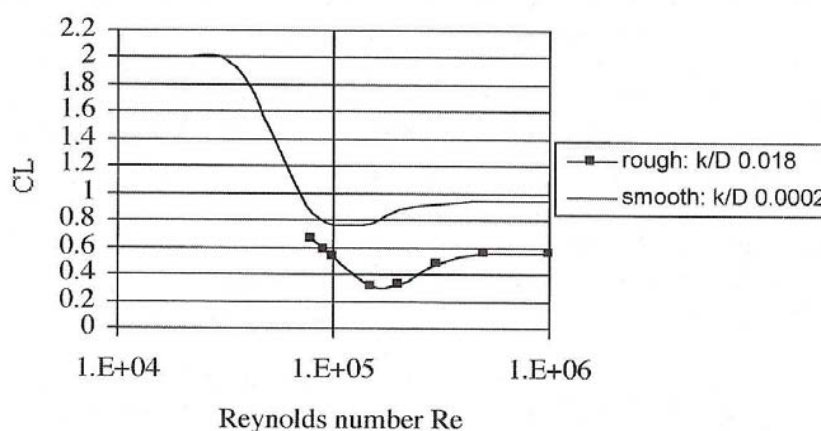
Ένας υποθαλάσσιος αγωγός συνήθως εδράζεται στον πυθμένα και η ταχύτητα μεταβάλλεται καθ' ύψος πάνω από τον πυθμένα. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται ένα σταθερό ύψος αναφοράς για την ταχύτητα U στον προσδιορισμό των συντελεστών C_D και C_L . Αυτό αποτελεί συχνά μια πηγή σύγχυσης καθώς διάφοροι μελετητές χρησιμοποιούν διαφορετικές ταχύτητες αναφοράς. Οι συντελεστές C_D και C_L είναι συναρτήσεις του αριθμού Reynolds, $Re=U \cdot D/\nu$, όπου ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα. Ακόμη, οι συντελεστές C_D και C_L εξαρτώνται από την τραχύτητα του αγωγού, καθώς η τραχύτητα επηρεάζει τη θέση

όπου θα υπάρξει διαχωρισμός της ροής. Η τραχύτητα μπορεί να εκφραστεί μέσω του λόγου k/D , όπου k είναι παράμετρος της τραχύτητας. Εκτός από τα παραπάνω, οι συντελεστές εξαρτώνται και από το προφίλ ταχυτήτων, την ένταση της τύρβης στη ροή, την τραχύτητα του πυθμένα ανάντι και το επίπεδο ιζηματομεταφοράς.

Σύμφωνα με μια αξιόπιστη σειρά μετρήσεων που διεξήχθησαν στην Αγγλία σε διατομές αγωγών διαμέτρου 305mm, 610mm και 915mm, εξοπλισμένες με κατάλληλα όργανα, με ένα ισχυρό παλιρροϊκό ρεύμα στις εκβολές του Severn. Οι διάμετροι που εξετάστηκαν καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος του χρησιμοποιούμενου εύρους τιμών στον σχεδιασμό υποθαλάσσιων αγωγών. Με τις δοκιμές εξετάστηκαν τόσο τραχείς (με λόγο $k/D=0.018$, που αντιστοιχεί σε πολύ τραχύ σκυρόδεμα) όσο και λείοι αγωγοί (με $k/D=0.00024$, που αντιστοιχεί σε ένα λείο υλικό), και βρέθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις, ιδιαίτερα στους συντελεστές ανύψωσης C_L . Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται σε απλοποιημένη μορφή στα Σχήματα 3.4 και 3.5.



Σχήμα 3.4: Συσχέτιση μεταξύ συντελεστή έλξης C_D και του αριθμού Reynolds Re (Ζερβού, 2014).



Σχήμα 3.5: Συσχέτιση μεταξύ συντελεστή ανύψωσης C_L και του αριθμού Reynolds Re (Ζερβού, 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Καταπόνηση υποθαλάσσιων αγωγών από κατολισθήσεις

Οι ραγδαίες εξελίξεις αναφορικά με την εξόρυξη και τη μεταφορά των υδρογονανθράκων από μεγαλύτερα βάθη έχει ως επακόλουθο μεγαλύτερους πιθανούς κινδύνους για τους υποθαλάσσιους αγωγούς. Ένας από τους πιο σημαντικούς γεωκινδύνους για έναν υποθαλάσσιο αγωγο μεταφοράς υδρογονανθράκων είναι οι κατολισθήσεις. Οι αγωγοί μεγάλων βαθών διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να εκτεθούν σε κατολίσθηση από ό,τι άλλες υποθαλάσσιες κατασκευές. Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες: το μήκος του εγκατεστημένου αγωγού αυξάνει την έκθεση του στον κίνδυνο των κατολισθήσεων, και η αντοχή των αγωγών είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με τις μεγάλες επιβαλλόμενες δυνάμεις εξαιτίας μιας εκτεταμένης υποθαλάσσιας κατολίσθησης.

4.1 Ορισμός

Σύμφωνα με τον ορισμό του Varnes (1978) με τον όρο *κατολίσθηση* ορίζεται η μετακίνηση μαζών εδάφους (mass ground movements), στις οποίες συμπεριλαμβάνεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρσανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε χερσαίες (onshore) και υποθαλάσσιες (submarine). Οι χερσαίες κατολισθήσεις μπορούν να είναι αποτέλεσμα τόσο σεισμικών δονήσεων οι οποίες αυξάνουν τις πλευρικές δυνάμεις, όσο και αυξημένης παρουσίας νερού που μειώνει την αντίσταση των εδαφών σε κινήσεις κατωφέρειας. Αντίστοιχα, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, που αποτελούν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, μπορούν να είναι αποτέλεσμα τόσο σεισμικών δονήσεων όσο και θαλάσσιων κυμάτων, και θα παρουσιασθούν αναλυτικά στη συνέχεια.

4.2 Χαρακτηριστικά Κατολισθήσεων

Εκτός από τον ορισμό περί κατολισθήσεως, ο Varnes (1978) πρότεινε το παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 4.1 που απεικονίζει τα χαρακτηριστικά σε μία ιδεατή σύνθετη κίνηση. Γενικά οι κατολισθήσεις έχουν τα εξής χαρακτηριστικά (Cruden & Varnes, 1996):

Κύρια τομή: η απότομη επιφάνεια, η οποία δημιουργείται στο αμετακίνητο έδαφος γύρω από την περιφέρεια της μετακίνησης. Αιτία πρόκλησης αποτελεί η απομάκρυνση του ολισθαίνοντος υλικού από το αδιατάρακτο υλικό.

Δευτερεύουσες τομές: οι απότομες επιφάνειες του μετατοπισμένου υλικού που προκύπτουν από τις διαφορικές κινήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του υλικού.

Κεφαλή: εντοπίζεται στο ανώτερο μέρος της κατολίσθησης και αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα της ολισθαίνουσας μάζας και κατά μήκος της επαφής ανάμεσα στο υλικό που μετακινήθηκε και την κύρια τομή.

Κορυφή: το ψηλότερο σημείο της επαφής του μετακινούμενου υλικού και της κύριας τομής.

Στέψη: το αμετακίνητο υλικό που εντοπίζεται στο υψηλότερο σημείο της κύριας τομής.

Κύριο σώμα: η μάζα του υλικού που έχει μετακινηθεί, και αποτελείται από τη συσσώρευση του υλικού, το οποίο αφού έχει μετακινηθεί κατά μήκος μιας διαδρομής, σταματάει την πορεία του και συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος του σώματος της κατολίσθησης.

Επιφάνεια θραύσης: η επιφάνεια όπου γίνεται η μετακίνηση της μάζας που ολισθαίνει, η οποία προκύπτει από την αποκόλλησή της από το σταθερό υπόβαθρο.

Επιφάνεια αποκόλλησης: αποτελεί τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους, η οποία καλύπτεται από το πόδι της κατολίσθησης.

Πόδι: το χαμηλότερο τμήμα του κύριου σώματος.

Δάκτυλο: το κατώτερο και πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή, περιθώριο του μετατοπισμένου υλικού της κατολίσθησης.

Δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης: η διατομή ανάμεσα στο κατώτερο όριο της επιφάνειας θραύσης και στην αρχική επιφάνεια του εδάφους.

Αιχμή: το πιο απομακρυσμένο, από την κορυφή της κατολίσθησης, σημείο που βρίσκεται στο πόδι.

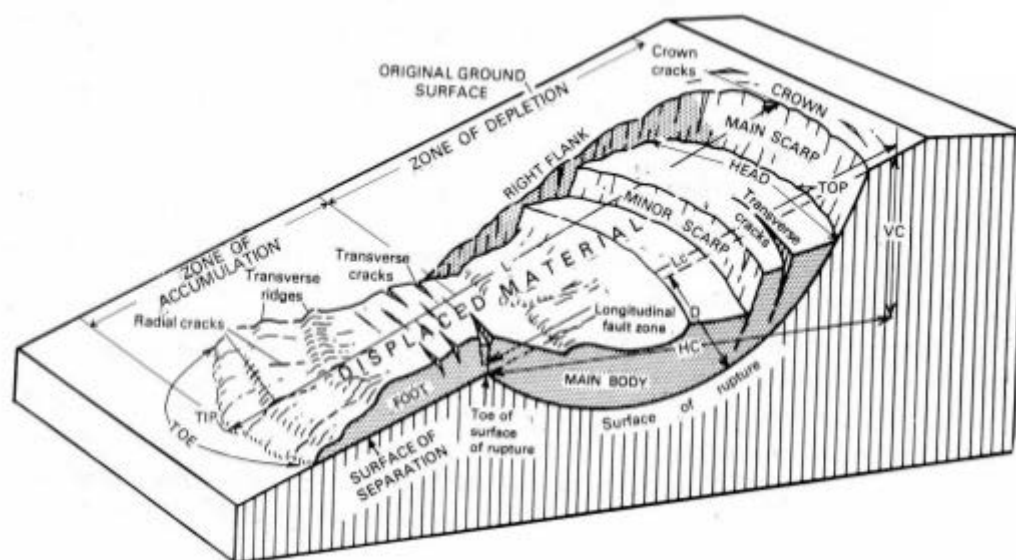
Ζώνη βυθίσεως: η περιοχή της κατολίσθησης, όπου το υλικό που έχει μετατοπιστεί βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια.

Ζώνη διογκώσεως: η περιοχή της κατολίσθησης όπου το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.

Πτερύγιο: το αμετακίνητο υλικό, το οποίο βρίσκεται δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας θραύσης.

Μετατοπισμένα υλικά: τα υλικά που μετατοπίζονται από την αρχική στην τελική θέση.

Αρχική επιφάνεια του εδάφους: η επιφάνεια της πλαγιάς όπως ήταν πριν την κατολίσθηση.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά μιας ιδεατής σύνθετης μετακίνησης (Varnes, 1978).

4.3 Υποθαλάσσιες Κατολισθήσεις

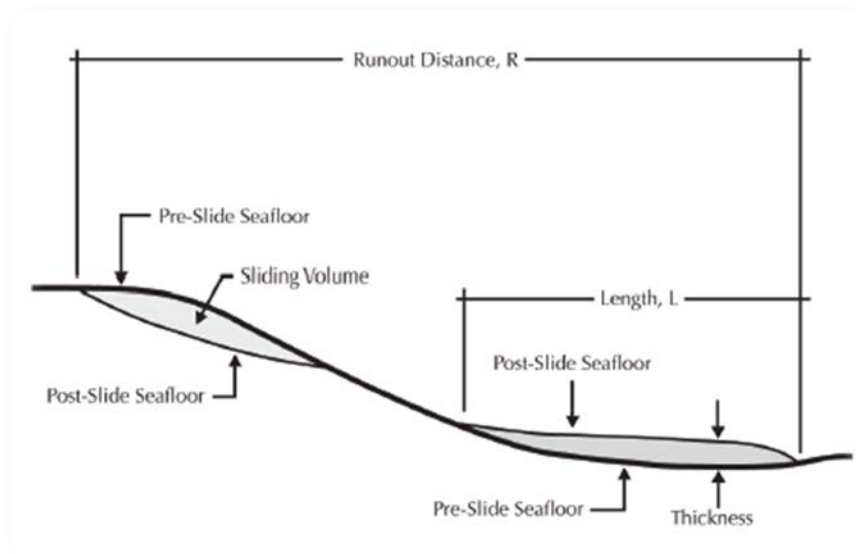
Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις δημιουργούνται κυρίως λόγω σεισμικών δονήσεων ή θαλάσσιων κυμάτων, ή πιο σπάνια εξαιτίας της διάβρωσης του βυθού και των ηφαιστειών λάσπης. Οι κατολισθήσεις λόγω σεισμικών δονήσεων αφορούν περιοχές που παρουσιάζουν υψηλή σεισμικότητα, ενώ οι κατολισθήσεις λόγω κυμάτων αφορούν παραλιακές περιοχές και δέλτα ποταμών. Τόσο τα σεισμικά όσο και τα θαλάσσια κύματα αποτελούν δυναμικές κυκλικές φορτίσεις που μπορούν να αυξήσουν την πίεση του νερού των πόρων σε αμμώδη εδάφη και να οδηγήσουν σε μείωση της διατμητικής αντοχής και σε ρευστοποίηση.

Ο μηχανισμός και οι μορφές αστοχίας των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων λόγω σεισμού είναι παρόμοιες με των χερσαίων κατολισθήσεων. Ο μηχανισμός αστοχίας λόγω θαλάσσιων κυμάτων είναι διαφορετικός και οφείλεται στη διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ σημείων του βυθού που βρίσκονται κάτω από το υψηλότερο και το χαμηλότερο σημείο ενός κύματος. Όταν το υψηλότερο σημείο του κύματος βρίσκεται επάνω από το φρύδι

ενός πρανούς, ενώ το χαμηλότερο επάνω από τον πόδα του πρανούς, η υψηλότερη κατακόρυφη πίεση στο φρύδι σε σχέση με τον πόδα αυξάνει τις δυνάμεις και τις ροπές ανατροπής του πρανούς. Βέβαια, η συχνότερη αιτία υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι οι σεισμικές διεγέρσεις.

Χαρακτηριστικό των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι ότι εμφανίζονται σε πολύ μικρότερες γωνίες πρανών και εξαπλώνονται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύγκριση με τις χερσαίες κατολισθήσεις. Οι πλέον συνηθισμένες γωνίες κλίσης πρανούς για πρόκληση υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι οι 4° με 5° , ενώ έχουν παρατηρηθεί κατολισθήσεις και για γωνίες 0.5° , οι οποίες βέβαια το πιθανότερο είναι να οφείλονται σε ρευστοποίηση του αμμόδους πυθμένα. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται μία απλοποιημένη γεωμετρία μίας υποθαλάσσιας καθίζησης. Το μέγεθος των αποστάσεων που εκτείνονται οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, R , φαίνεται από τον μέσο όρο του που είναι 8 km και από το γεγονός ότι σπάνια γίνεται αντιληπτή κατολίσθηση κάτω των 300 m. Μία σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά των υποθαλάσσιων αγωγών υπό κατολισθήσεις είναι το μήκος, L , και το πλάτος, W , της κατολίσθησης. Μέσες τιμές των παραπάνω παραμέτρων είναι τα 25 km για το πλάτος και τα 2.8 km για το μήκος (Liu et al., 2012).

Γενικά, επειδή ένα δίκτυο αγωγών μπορεί να διασχίζει τις ζώνες κατολισθήσεων σε οποιαδήποτε θέση και διεύθυνση, πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά η παράλληλη και η εγκάρσια καταπόνηση του αγωγού εξαιτίας των δυνάμεων που θα του επιβάλλουν οι κατολισθήσεις. Κατά την παράλληλη διεύθυνση το δίκτυο αγωγών θα υποστεί εφελκυσμό στο φρύδι του πρανούς και θλίψη στον πόδα, ενώ στην κάθετη διεύθυνση ο αγωγός θα καταπονηθεί κυρίως λόγω κάμψης.



Σχήμα 4.2: Απλοποιημένη μορφή υποθαλάσσιας καθίζησης (Liu et al., 2015).

4.4 Επίδραση κατολισθήσεων σε υποθαλάσσιο αγωγό

Η υποθαλάσσια κατολίσθηση (για βάθος άνω των 5 m) αποτελεί τον πιο μεγάλο γεωκίνδυνο για έργα αγωγών εξαιτίας των παρακάτω λόγων:

- Το μεγάλο μέγεθος αυτών των κατολισθήσεων (πλάτος και μήκος που κυμαίνεται από αρκετές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα).
- Την όχι εύκολα προβλέψιμη εικόνα της κατολίσθησης που οφείλεται στη μεγάλη πολυπλοκότητα της προσωμοίωσης της εδαφικής κίνησης, καθώς και στην τυχαία φύση των συμβάντων ενεργοποίησης.

Η αδυναμία πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας κατολίσθησης αναφέρεται στη συχνότητα/μέγεθος των κινήσεων και στον τύπο των εδαφικών παραμορφώσεων, που μπορεί να εμφανιστούν στα διαφορετικά τμήματα της ζώνης κατολίσθησης. Λόγω της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τη συμπεριφορά της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας υπάρχει δυσκολία στην επίτευξη σημαντικής μείωσης του κινδύνου ακόμα και αν γίνει σημαντική προσπάθεια σε χρόνο και πόρους. Συνήθως, η διέλευση από μια περιοχή έντονων κατολισθήσεων με εφαρμογή μέτρων μετριασμού/προστασίας δεν αποτελεί μία καλή και ασφαλή επιλογή για την χάραξη ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα από τα πιθανά αίτια ενεργοποίησης μιας κατολίσθησης είναι η κίνηση του εδάφους που προκαλείται από σεισμούς, η οποία δεν μπορεί να αποφευχθεί/μετριαστεί.

Επομένως, η αποφυγή τέτοιων θέσεων θεωρείται ως η καταλληλότερη στρατηγική για την χάραξη της όδευσης ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Αντιθέτως, η διέλευση από σημεία με κατολισθήσεις σε μικρό βάθος (μικρότερο των 5 m) και από περιοχές που είναι πιθανό να γίνουν κατολισθήσεις μικρού πάχους είναι συνήθως εφικτή με εφαρμογή κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης. Στους χερσαίους αγωγούς τα μέτρα αντιμετώπισης περιλαμβάνουν την υπογειοποίηση του αγωγού κάτω από τη βάση του κινούμενου εδάφους και τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης (π.χ., τροποποίηση της γεωμετρίας πρανούς με χωματουργικές εργασίες, αποστράγγιση, εφαρμογή μέτρων περιορισμού, έλεγχο διάβρωσης, κλπ.), κάτι που είναι σχεδόν αδύνατο να γίνει υποθαλάσσια.

Οι πιο κοινές επιπτώσεις που προκαλούνται σε έναν αγωγό από μια κατολίσθηση, οι οποίες σχετίζονται με τις εδαφικές παραμορφώσεις, περιλαμβάνουν:

- πλευρική μετατόπιση αγωγού,
- καθίζηση αγωγού,
- ανύψωση αγωγού,

- σημαντική πλαστική παραμόρφωση του υλικού των τοιχωμάτων του αγωγού,
- απώλεια στήριξης (δηλαδή, απώλεια των εδαφικών στηριγμάτων σε περίπτωση όπου μια κατολίσθηση απομακρύνει εδαφικό υλικό σε σημαντικό μήκος της τάφρου του αγωγού),
- αύξηση του στατικού φορτίου στον αγωγό (δηλαδή, ο αγωγός θάβεται κάτω από τα φερτά υλικά της κατολίσθησης).
- προσωρινή αύξηση του δυναμικού φορτίου επάνω στον αγωγό (π.χ. καταπόνηση από καταπτώσεις βραχίονων τεμαχίων).

4.5 Βασικά Μεγέθη Κατολισθήσεων και Αναλυτικός Τρόπος Υπολογισμού τους

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια μελέτη περιπτώσεων σχετικά με την τρωτότητα του αγωγού σε διάφορες συνθήκες κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση του προβλήματος γίνεται ως εξής: ο αγωγός προσωμοιώνεται σαν ένα ελαστικό καλώδιο, το φαινόμενο της κατολίσθησης ως κατανεμημένο φορτίο και το έδαφος ως μια σταθερή πλαστική αντίσταση. Το αριθμητικό προσωμοίωμα μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που θα αναλυθεί περαιτέρω στο Κεφάλαιο 5.

4.5.1 Βασικές εξισώσεις υποβρύχιας κατολίσθησης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, η επίδραση μιας κατολίσθησης θα οδηγήσει στην εκτροπή του αγωγού και στην αλλαγή της αξονικής του δύναμης. Οι διαφορικές εξισώσεις ελέγχου της ζώνης κατολίσθησης λαμβάνονται από την ισορροπία δυνάμεων στην κάθετη προς τον άξονα του αγωγού διεύθυνση:

$$EIy_1''''(s) - Hy_1''(s) = q - p, \quad (0 \leq s \leq s_1) \quad (4.1)$$

$$EIy_2''''(s) - Hy_2''(s) = p, \quad (s_1 \leq s \leq s_2) \quad (4.2)$$

$$EIy_3''''(s) - Hy_3''(s) + ky_3(s) = 0 \quad (s_2 \leq s \leq s_3) \quad (4.3)$$

όπου, $y_1(s)$, $y_2(s)$ και $y_3(s)$ οι παραμορφώσεις του αγωγού στα τμήματα $[P_0-P_1]$, $[P_1-P_2]$ και $[P_2-P_3]$ αντίστοιχα, s_1 , s_2 και s_3 τα μήκη του τόξου στα P_1 , P_2 και P_3 αντίστοιχα, (E) το μέτρο ελαστικότητας, (I) ροπή αδράνειας, (q) το φορτίο της υποβρύχιας κατολίσθησης, (p) η παθητική αντίσταση του εδάφους και (H) άγνωστη οριζόντια συνιστώσα της αξονικής δύναμης. Οι λύσεις των τριών διαφορικών εξισώσεων μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$y_1(s) = \frac{p-q}{2H} s^2 + c_1 + c_2 s + c_3 e^{\alpha s} - c_4 e^{-\alpha s} \quad (0 \leq s \leq s_1) \quad (4.4)$$

$$y_2(s) = \frac{p}{2H} s^2 + c_5 + c_6 s + c_7 e^{\alpha s} - c_8 e^{-\alpha s} \quad (s_1 \leq s \leq s_2) \quad (4.5)$$

$$y_3(s) = e^{\beta s} [c_9 \cos(\gamma s) + c_{10} \sin(\gamma s)] + e^{-\beta s} [c_{11} \cos(\gamma s) + c_{12} \sin(\gamma s)], \quad (s_2 \leq s \leq s_3) \quad (4.6)$$

όπου c_1 έως c_{12} άγνωστοι συντελεστές και :

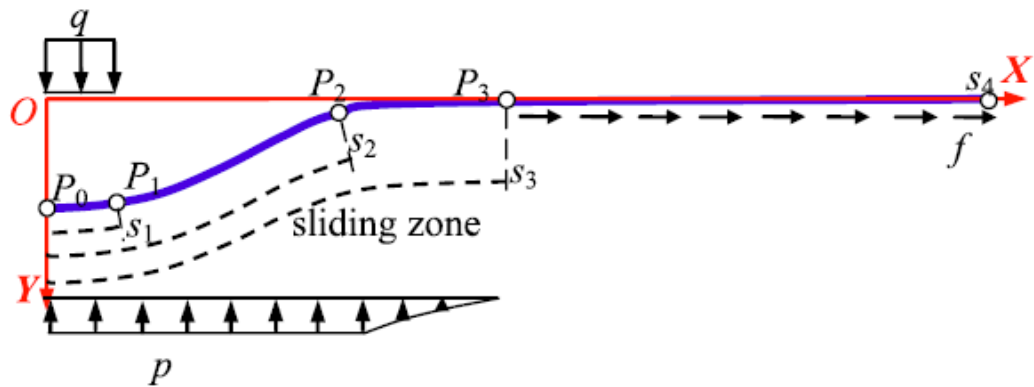
$$\alpha = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (4.7\alpha)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{H}{EL} + 2\sqrt{\frac{k}{EI}}} \quad (4.7\beta)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{H}{EL} + 2\sqrt{\frac{k}{EI}}} \quad (4.7\gamma)$$

Το ανώτερο όριο της συνιστώσας της οριζόντιας δύναμης (H) μπορεί να υπολογιστεί από την αφαίρεση της Εξίσωσης (4.7γ) από την Εξίσωση (4.7α):

$$H \leq 2\sqrt{kEI} \quad (4.8)$$



Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση αγωγού, δύναμης κατολίσθησης, πλευρικής παθητικής αντίστασης εδάφους και αξονικής αντίστασης εδάφους (Yuan et al., 2014).

4.5.2 Λύση των εξισώσεων

Λαμβάνοντας υπόψη τη συνέχεια της μετατόπισης, της γωνίας κλίσης της ροπής κάμψης και της διάτμησης στον αγωγό, οι συντελεστές (c_9) και (c_{10}) απλοποιούνται σε μηδενικούς και το

αποτέλεσμα είναι ένα μαθηματικό πρόβλημα με 12 αγνώστους και ένα σύστημα 12 εξισώσεων που είναι ιδιαίτερα μη γραμμικές (Yuan *et al.*, 2014):

$$P_0: \begin{cases} y_1'(0) = 0 \\ y_1'''(0) = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$P_1: \begin{cases} y_1(s_1) = y_2(s_1) \\ y_1'(s_1) = y_2'(s_1) \\ y_1''(s_1) = y_2''(s_1) \\ y_1'''(s_1) = y_2'''(s_1) \end{cases} \quad (4.10)$$

$$P_2: \begin{cases} y_2(s_2) = 0.1D \\ y_3(s_2) = 0.1D \\ y_2'(s_2) = y_3'(s_2) \\ y_2''(s_2) = y_3''(s_2) \\ y_2'''(s_2) = y_3'''(s_2) \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{s_3} \frac{T}{EA} ds + \frac{H^2}{2EAf_0} \\ = \int_0^{s_1} \sqrt{1 + y_1'^2(s)} ds + \int_1^{s_2} \sqrt{1 + y_2'^2(s)} ds + \int_{s_2}^{s_3} \sqrt{1 + y_3'^2(s)} ds - s_3 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Η τελευταία λαμβάνεται εξισώνοντας την επιμήκυνση του αγωγού ως αποτέλεσμα της αξονικής δύναμης (που είναι το αριστερό μέλος της Εξίσωσης (4.12)) με την επιμήκυνση του παραμορφωμένου τμήματος του αγωγού (που είναι το δεξί μέλος της Εξίσωσης (4.12)). Στη συνέχεια το σύστημα επιλύεται χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική αριθμητική μέθοδο ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Θεωρείται πως η οριζόντια δύναμη (H) είναι το ανώτερο όριο, $H=2\sqrt{kEI}$, όπως προκύπτει από την Εξίσωση (4.8).
2. Εισαγωγή του (H) στις Εξισώσεις (4.9)-(4.11) για τον υπολογισμό c_1 - c_8 , c_{11} και c_{12}
3. Αντικατάσταση των τιμών που βρέθηκαν στο βήμα 2, στην Εξίσωση (4.11)
4. Αντικατάσταση της παραμέτρου s_2 με ένα υποτιθέμενο όριο το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$s_{2,upper} = \frac{q}{p} s_1 \quad (4.13)$$

το οποίο λαμβάνεται υποθέτοντας πως η δύναμη κατολίσθησης από 0 έως s_1 είναι πλήρως ισορροπημένη από την αντίσταση του εδάφους από 0 έως s_2 . Στη συνέχεια αναθεωρείται συνεχώς το s_2 για να επιβεβαιωθεί πως η διατμητική συνέχεια στο P_2 είναι ικανοποιητική. $|y_2'''(s_2) - y_3'''(s_2)| < \eta_1$, όπου (η_1) είναι μια μικρή ποσότητα.

5. Αν η παραπάνω συνθήκη επιβεβαιωθεί τότε το s_2 λαμβάνεται και μαζί με τις υπόλοιπες γνωστές παραμέτρους τοποθετείται στην Εξίσωση (4.14) για τον υπολογισμό της αξονικής τριβής, (f):

$$f = \frac{T^2}{2EA[\int_0^{s_1} \sqrt{1 + y_1'^2(s)} ds + \int_0^{s_2} \sqrt{1 + y_2'^2(s)} ds + \int_{s_2}^{s_3} \sqrt{1 + y_3'^2(s)} ds - s_3 - \int_0^{s_3} \frac{T}{EA} ds]} \quad (4.14)$$

που προκύπτει από την Εξίσωση (4.12). Στη συνέχεια η οριζόντια τάση (H) αναθεωρείται συνεχώς μέχρι $|f - f_0| < \eta_2$, όπου (η_2) είναι το όριο σύγκλισης. Η συνθήκη αυτή ελέγχει το (f) σε σχέση με το αρχικό (f_0) του προβλήματος και ορίζει το τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας όταν η μεταξύ τους διαφορά είναι μικρή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αριθμητική Προσομοίωση Υποθαλάσσιου Αγωγού υπό Κατολίσθηση

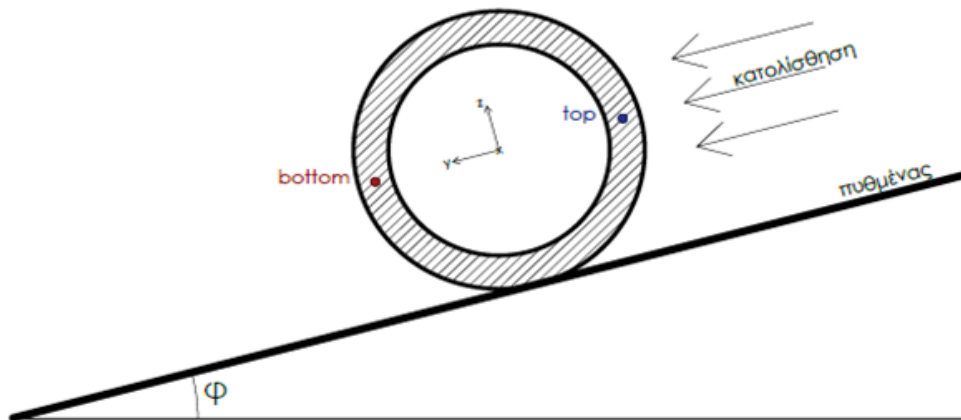
Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η περιγραφή των τριών διαφορετικών προβλημάτων τα οποία εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του υπολογιστικού προσομοιώματος του υποθαλάσσιου αγωγού. Η ανάλυση του προβλήματος έγινε με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το λογισμικό ABAQUS. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία προσομοίωσης στο ABAQUS και αναφέρονται οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιώματα που εξετάστηκαν.

5.1 Περιγραφή του προβλήματος

Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους που έχουν να αντιμετωπίσουν οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι το φαινόμενο της μετακίνησης του εδάφους κάθετα ή και σε άλλες διευθύνσεις ως προς τον άξονα τους. Ο εν λόγω κίνδυνος είναι πιθανός όταν ο αγωγός διέρχεται από μια περιοχή που είναι πιθανή η εμφάνιση κατολισθήσεων. Αποτέλεσμα μιας κατολίσθησης είναι η ανάπτυξη αξονικών τάσεων και παραμορφώσεων στον αγωγό λόγω της αλληλεπίδρασης του με το μετακινούμενο έδαφος, η δημιουργία θλιβόμενων και εφελκυσμένων ζωνών και τελικά η αστοχία του αγωγού εφόσον οι παραμορφώσεις υπερβούν κάποια συγκεκριμένα όρια. Η αστοχία του αγωγού εμφανίζεται συνήθως λόγω θλίψης, και πιο συγκεκριμένα λόγω τοπικού λυγισμού. Σκοπός της διερεύνησης που παρατίθεται στη συνέχεια του κεφαλαίου είναι η μελέτη της συμπεριφοράς χαλύβδινων συνεχών αγωγών υδρογονανθράκων υπό την επίδραση του μετακινούμενου εδάφους για διάφορες συνθήκες κατολίσθησης.

Γενικά, κατολισθήσεις ονομάζονται οι μετακινήσεις εδαφικών μαζών και διακρίνονται σε χερσαίες και υποθαλάσσιες. Το αίτιο δημιουργίας τους δύναται να είναι κάποιο σεισμικό γεγονός αλλά και άλλες αιτίες, όπως έντονη βροχόπτωση. Οι σεισμικές κατολισθήσεις οφείλονται στην αύξηση των πλευρικών δυνάμεων λόγω των σεισμικών κυμάτων. Ειδική κατηγορία σεισμικών κατολισθήσεων είναι η πλευρική εξάπλωση, η οποία οφείλεται στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων εξαιτίας της σεισμικής δόνησης.

Το βασικό προσομοίωμα της παρούσας εργασίας αντιπροσωπεύει έναν τυπικό υποθαλάσσιο αγωγό 3 χιλιομέτρων, υψηλής πίεσης που υπόκειται σε πλευρική μετατόπιση λόγω κατολίσθησης που συμβαίνει στο μέσον του. Ο αγωγός αυτός εξετάστηκε ως προς την απόκριση του στο φαινόμενο της υποθαλάσσιας κατολίσθησης για αρκετές διαφορετικές περιπτώσεις. Σε αυτό το σημείο θεωρείται σημαντικό να τονιστεί πως οι άξονες X και Y που αναφέρονται στη συνέχεια ορίζονται ως εξής: ο άξονας $X'X$ ορίζεται ως ο άξονας κατά μήκος του αγωγού και ο άξονας $Y'Y$ ως ο κάθετος, ως προς τον άξονα του αγωγού, ο οποίος όμως βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τον $X'X$. Το Σχήμα 5.1 απεικονίζει την διατομή του αγωγού σε σχέση με τους άξονες σε κεκλιμένο πυθμένα και διευκρινίζει τα σημεία ανάντι και κατάντι (bottom-top) στα οποία στη συνέχεια εξετάζεται η απόκριση του αγωγού.



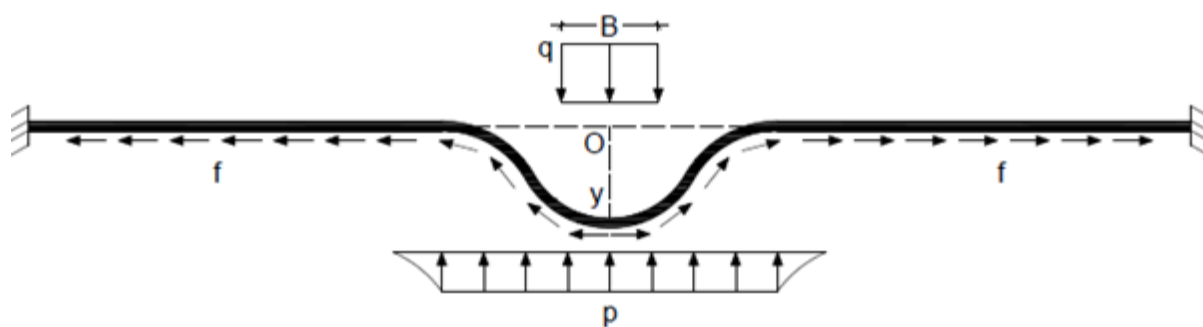
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα προσδιορισμού αξόνων και ανάντι κι κατάντι πλευράς.

Αρχικά ο αγωγός θεωρείται ότι μεταφέρει φυσικό αέριο και δέχεται μια κάθετη ως προς τον άξονα του δύναμη εξαιτίας της κατολίσθησης. Η διερεύνηση αυτή χρησιμοποιεί ως παραμέτρους τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης όπως το φορτίο (q) και το πλάτος της (B), τα χαρακτηριστικά του αγωγού δηλαδή τη διατομή και πιο συγκεκριμένα το λόγο της διαμέτρου ως προς το πάχος του τοιχώματος (D/t), την εσωτερική πίεση (P_{in}) και την τάση διαρροής του υλικού του (f_y) και χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος του αγωγού, όπως η κλίση του πυθμένα (ϕ) πάνω στον οποίο αυτός εδράζεται. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η

κάτοψη του αγωγού και στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η πλάγια όψη του αγωγού όταν βρίσκεται υπό κλίση (φ).

Στη συνέχεια, θεωρείται ότι ο αγωγός μεταφέρει φυσικό αέριο αλλά η διαφορά με την πρώτη περίπτωση είναι πως η κατολίσθηση δεν είναι κάθετη στον άξονα του αγωγού αλλά σχηματίζει γωνία (θ), οι τιμές της οποίας αποτελούν και τις παραμέτρους της συγκεκριμένης μελέτης. Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται η συγκεκριμένη περίπτωση.

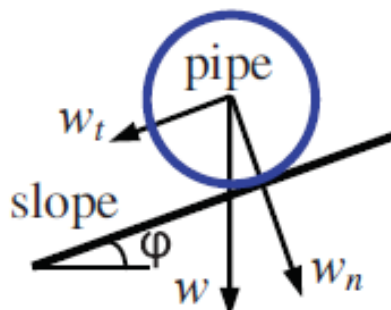
Τέλος, ο εξεταζόμενος αγωγός θεωρείται ότι μεταφέρει πετρέλαιο. Έχει τα ίδια σχεδιαστικά χαρακτηριστικά με τον αγωγό φυσικού αερίου, προκειμένου να μπορεί να γίνει μεταξύ τους σύγκριση, εκτός από την παράμετρο της εσωτερικής πίεσης που είναι διαφορετική, καθώς οι αγωγοί πετρελαίου λειτουργούν σε πολύ μικρότερες πιέσεις σε σχέση με τους αγωγούς φυσικού αερίου. Επίσης, το πετρέλαιο είναι πολύ βαρύτερο σε σχέση με το σχεδόν αβαρές φυσικό αέριο, οπότε όταν ο αγωγός βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο η επίδραση του βάρους του είναι σημαντική. Το ίδιο βάρος του πετρελαίου εφαρμόστηκε στο προσωμοίωμα του αγωγού μέσω του ειδικού βάρους του ρευστού. Ο αγωγός πετρελαίου εξετάστηκε για διάφορες γωνίες κλίσεως εδάφους ώστε να μελετηθεί η απόκριση του αγωγού υπό την επίδραση του βάρους του ρευστού. Πιο συγκεκριμένα, οι γωνίες κλίσης (φ) του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίσες με 0° , 15° και 30° , ούτως ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.



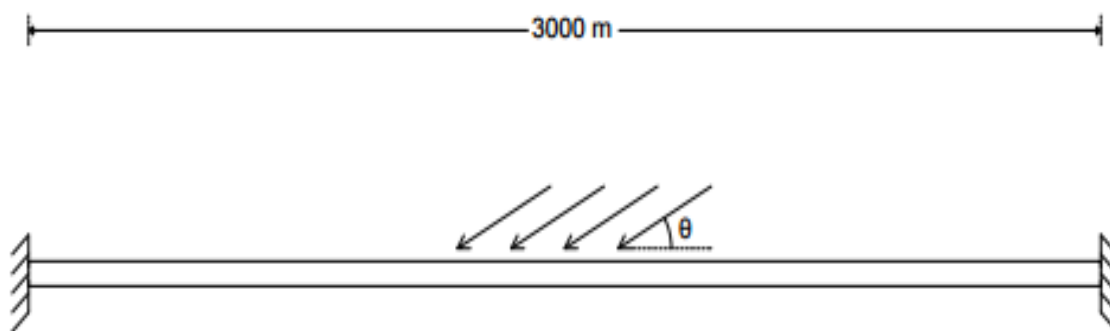
Σχήμα 5.2: Κάτοψη αγωγού υποκείμενου σε κατολίσθηση στο μέσον του.

Ο αγωγός θεωρείται ότι βρίσκεται μεταξύ δύο σταθερών σημείων (δηλαδή οι πακτώσεις στα δυο άκρα), τα οποία θα μπορούσαν να είναι, για παράδειγμα, μια καμπύλωση του αγωγού, μια αγκύρωση του, ένα σημείο σύνδεσης με κάποια άλλη κατασκευή, κλπ. Οι δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό λόγω της κατολίσθησης μπορεί να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας γεωτεχνικές ή υδροδυναμικές μεθόδους (Liu et al., 2015). Ο υπολογισμός των δυνάμεων της κατολίσθησης είναι πέρα από τους στόχους αυτής της εργασίας, ως εκ

τούτου, η επίδραση της κατολίσθησης προσομοιώνεται με ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο γραμμικό φορτίο (q) σε μια ζώνη πλάτους (B) στο μέσον του αγωγού σύμφωνα με τους Yuan et al. (2014).



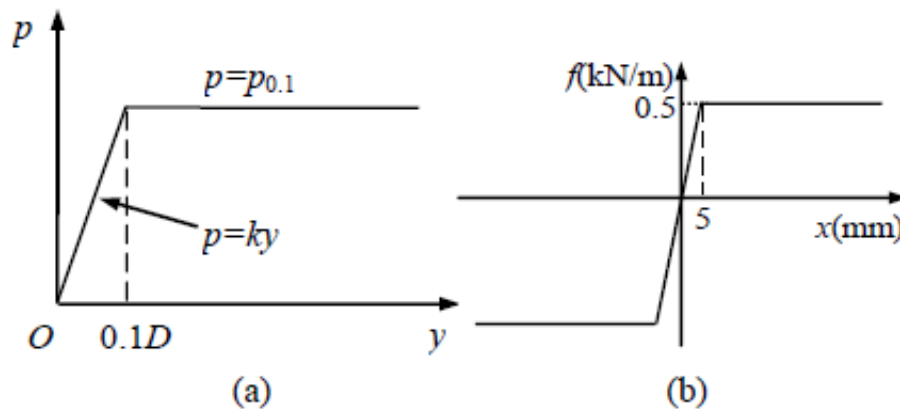
Σχήμα 5.3: Πλάγια όψη αγωγού υπό κατολίσθηση σε πυθμένα με κλίση φ (Yuan et al., 2014).



Σχήμα 5.4: Κάτοψη αγωγού υποκείμενου σε κατολίσθηση υπό γωνία θ .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, λαμβάνονται υπόψη η πλευρική δύναμη (p) η αξονική δύναμη (f) και οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους. Το πρόβλημα προσεγγίζεται στις δυο διαστάσεις (2D) και επομένως η κατακόρυφη αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο αναλυτικός υπολογισμός των δυνάμεων αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους και των σχετικών μετατοπίσεων είναι επίσης εκτός των στόχων αυτής της εργασίας, ως εκ τούτου, για τις πλευρικές και αξονικές δυνάμεις - μετακινήσεις θεωρείται μια τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η σχέση δύναμης - μετακίνησης για εγκάρσια και αξονική μετακίνηση του εδάφους. Η μέγιστη δύναμη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους (p_0) εμφανίζεται για σχετική μετατόπιση αγωγού-εδάφους ίση με $0.1D$ στην εγκάρσια διεύθυνση. Αντίστοιχα, η μέγιστη αξονική δύναμη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους (f_0) δημιουργείται για μια αξονική σχετική μετατόπιση αγωγού-εδάφους ίση με 5 mm . Τα εν λόγω γραφήματα έχουν προταθεί από τους Yuan et al.

(2014) και με βάση την μελέτη αυτή αναπτύχθηκαν και επαληθεύθηκαν τα αριθμητικά προσομοιώματα της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 5.5: Αλληλεπίδραση αγωγού για: (α) εγκάρσια και (β) αξονική μετατόπιση (Yuan et al., 2014).

Σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις το αριθμητικό προσομοίωμα διαιρείται σε τρία μέρη ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης και την εγγύτητα του ως προς τη ζώνη κατολίσθησης. Το κάθε τμήμα προσομοιώνεται με διαφορετική πυκνότητα, δηλαδή διαφορετικό μέγεθος στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο τμήμα είναι το μήκος του αγωγού στην περιοχή κατολίσθησης δηλαδή το μήκος του ισούται με το πλάτος της κατολίσθησης (B), στο οποίο το μέγεθος κάθε στοιχείου είναι ίσο με 0.5m. Η δύναμη λόγω της κατολίσθησης θεωρείται ομοιόμορφη κατά μήκος της περιοχής της κατολίσθησης και λαμβάνονται υπόψη η αξονική και η εγκάρσια μετατόπιση του εδάφους. Το δεύτερο τμήμα του προσομοιώματος είναι αυτό εκατέρωθεν της περιοχής κατολισθήσεως έως 1000 m από το μέσον του αγωγού. Λόγω της εγγύτητας στην περιοχή κατολίσθησης, το τμήμα αυτό προσομοιώνεται με στοιχεία μήκους 0.5 m, ενώ λαμβάνονται υπόψη τόσο οι αξονικές όσο και οι εγκάρσιες αντιδράσεις του εδάφους. Το τρίτο τμήμα είναι τα τελευταία 1000 m του αγωγού και στις δύο πλευρές μέχρι τα σταθερά άκρα (πακτώσεις). Αυτό το τμήμα προσομοιώνεται με στοιχεία μήκους 2m και λαμβάνονται υπόψη η αξονική και η εγκάρσια αντίδραση του εδάφους, αν και η εγκάρσια αντίδραση του εδάφους είναι πολύ μικρή.

Όπως είναι φυσικό, όλοι οι αγωγοί που είναι τοποθετημένοι σε υποθαλάσσιο περιβάλλον δέχονται κάποια σταθερά φορτία λόγω του ίδιου βάρους τους, του περιεχομένου τους αλλά και των εξωτερικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, για το βάρος του αγωγού θεωρήθηκε ότι η πυκνότητας του υλικού του, δηλαδή του χάλυβα, είναι 7800 kg/m^3 . Το βάρος του φυσικού αερίου είναι πολύ μικρό και συνήθως θεωρείται αμελητέο, εν αντιθέσει με την εσωτερική πίεση που επηρεάζει πολύ τη συμπεριφορά του αγωγού κατά την

κατολίσθηση. Για αυτόν τον λόγο, στην πρώτη παραμετρική ανάλυση εξετάζονται διάφορες εσωτερικές πιέσεις, και πιο συγκεκριμένα $P_{in} = 0, 7500$ και 15000 kPa. Όσον αφορά το πετρέλαιο, του οποίου το βάρος δεν είναι αμελητέο η επίδραση του υπολογίστηκε μέσω της πυκνότητας του, η οποία είναι ίση με 820 kg/m^3 .

Όσον αφορά στις εξωτερικές συνθήκες, όπως περιγράφεται και στο 3^ο Κεφάλαιο ένας υποθαλάσσιος αγωγός δέχεται την πίεση του νερού που τον περιβάλλει, καθώς και την άνωση του. Στην παρούσα εργασία η άνωση λαμβάνεται ως η μέγιστη με βάση τον κανονισμό DNV προκειμένου να μην εμφανιστεί αστάθεια του αγωγού στον πυθμένα. Η σχέση στην οποία βασίστηκε αυτός ο υπολογισμός παρουσιάζεται στην Εξίσωση (2.7). Με βάση αυτήν τη σχέση που προτείνεται από τον κανονισμό DNV, προκύπτει πως η μέγιστη άνωση ισούται με το 47.6% του βάρους του αγωγού. Για τις περιπτώσεις του αγωγού φυσικού αερίου η άνωση θεωρήθηκε ως το 47.6 % του ιδίου βάρους του. Για την περίπτωση του αγωγού πετρελαίου, μολονότι το ίδιο βάρος αυξάνεται, χρησιμοποιήθηκε η ίδια άνωση με παραπάνω ούτως ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Επειδή στην πραγματικότητα οι υποθαλάσσιοι αγωγοί δέχονται και επιπλέον βάρη (επικάλυψη, βαρίδια, κλπ) δεν χρησιμοποιείται η πραγματική τιμή της άνωσης για τη συγκεκριμένη διατομή αλλά μία ακραία τιμή της.

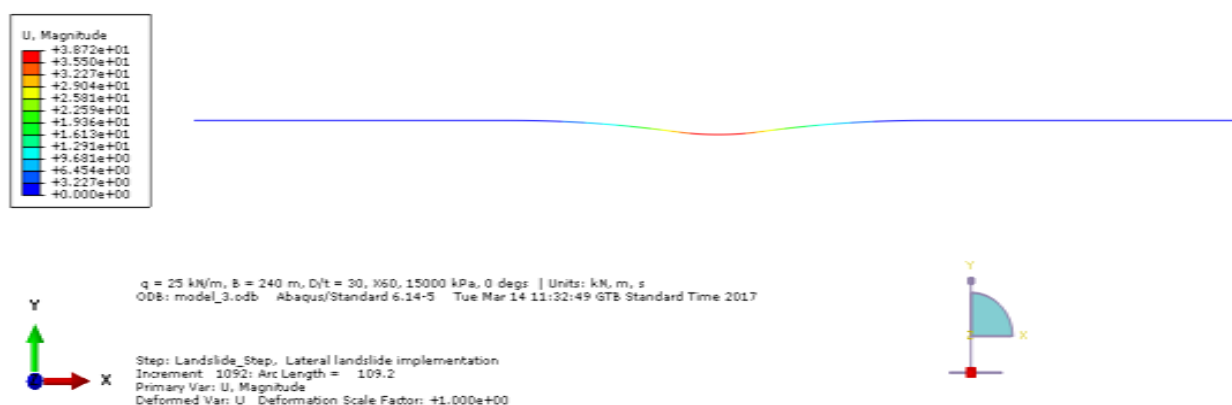
Η εξωτερική υδροστατική πίεση, μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη λόγω της μικρής διαμέτρου που έχει ο αγωγός και να ληφθεί ίση με την τιμή που αντιστοιχεί στο βάθος του μέσου του αγωγού. Θεωρώντας, λοιπόν, τον αγωγό τοποθετημένο στα 200 m από την επιφάνεια η εξωτερική πίεση που του ασκείται είναι ίση με $p_{ex} = 2000$ kPa και σε όλες τις περιπτώσεις. Το θέμα της εξωτερικής πίεσης (δηλαδή, της εξέτασης της θέσης του αγωγού σε διαφορετικά βάθη) χρήζει περεταίρω διερεύνησης, ειδικά για αγωγούς φυσικού αερίου ανάλογα και με τις συνθήκες όσον αφορά στην εσωτερική πίεση του αγωγού.

5.2 Περιγραφή Υπολογιστικού Προσομοιώματος

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος, δηλαδή μέθοδος υπολογισμού με χρήση H/Y για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Είναι μια προσεγγιστική μέθοδος η οποία μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα προβλήματα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η αποτελεσματικότητα

αυτής της μεθόδου είναι μεγάλη, για αυτό και χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην πράξη σε πολλούς κλάδους της μηχανικής.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια: Αρχικά εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD ή στο περιβάλλον του λογισμικού και δημιουργείται το διδιάστατο ή τριδιάστατο προσομοίωμα. Στη συνέχεια διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το πρόβλημα σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις σχετικές φορτίσεις και τις συνθήκες στηρίξης. Αυτή η διαδικασία αποτελεί το αρχικό στάδιο (pre-processing). Στη συνέχεια γίνεται η επίλυση του προβλήματος με κατάλληλες αριθμητικές μεθόδους. Όταν τελειώσει η επίλυση γίνεται μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων (post-processing), για να μπορέσει ο μελετητής να κατανοήσει και να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.6: Προσομοίωση εγκάρσιας μετατόπισης αγωγού υπό κατολίσθηση στο περιβάλλον του ABAQUS.

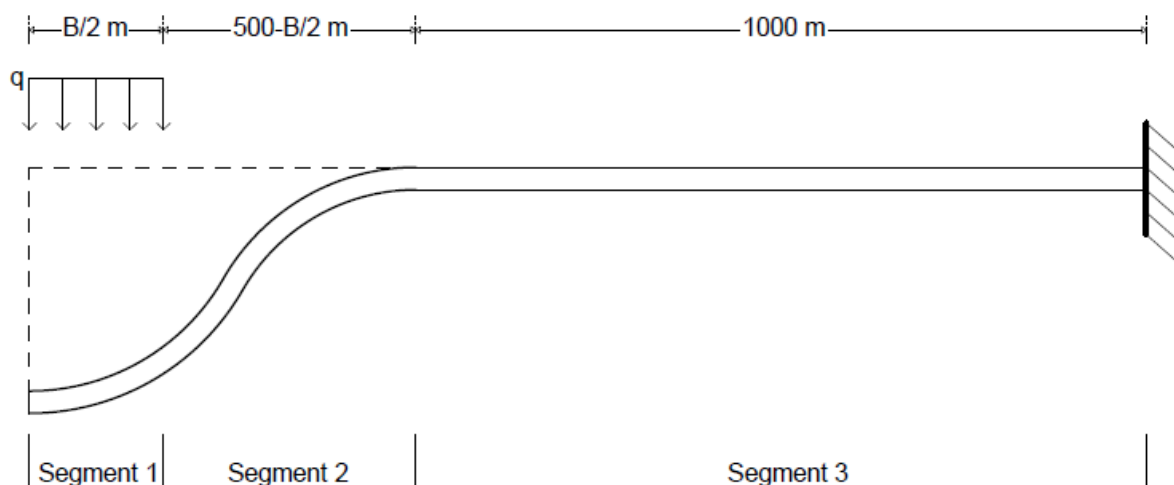
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιου αγωγού ο οποίος υπόκειται σε κατολίσθηση έγινε με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του λογισμικού ABAQUS 6.14 (2011). Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος και οι ιδιότητες των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS θεωρείται ένα από τα πιο αξιόπιστα μέσα προσομοίωσης αγωγών που υπόκεινται σε κατολίσθηση και χρησιμοποιείται ευρύτατα και στην πράξη πέρα από τις επιστημονικές μελέτες.

Το ABAQUS παρέχει μια μεγάλη ποικιλία πεπερασμένων στοιχείων για προσομοίωση αγωγών, όπως για παράδειγμα, ευθύγραμμα στοιχεία (Pipe elements), καμπυλωτά στοιχεία (Elbow elements), στοιχεία αλληλεπίδρασης (PSI elements), κ.α. Ο αγωγός στη συγκεκριμένη μελέτη προσομοιώθηκε με Pipe elements, αφού συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που έδιναν τα συγκεκριμένα στοιχεία σε σχέση με τα στοιχεία Elbow και αποδείχθηκαν πιο ακριβή (σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των μελετητών Yuan et al. (2014)) και με λιγότερο υπολογιστικό κόστος. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ένα τυπικό παραδείγμα του προσομοιώματος στο υπολογιστικό περιβάλλον του ABAQUS.

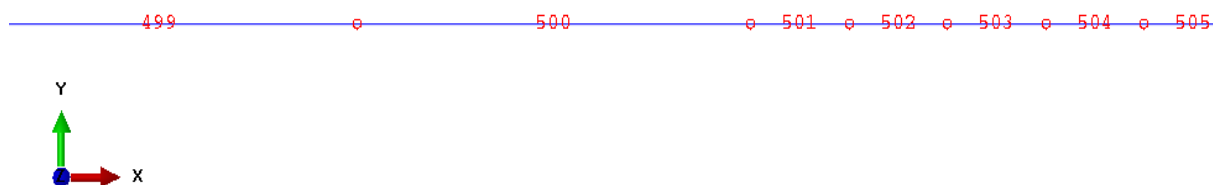
5.2.1 Διακριτοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων

Όπως προαναφέρθηκε ο αγωγός έχει συνολικό μήκος 3000m και αποτελείται από στοιχεία αγωγού (PIPE31 elements) μήκους 0.5 και 2m, έχει εξωτερική διάμετρο ίση με 0.9144m (3 ft) και στην αρχική παραμετρική διερεύνηση εξετάζεται για τρία διαφορετικά πάχη τοιχώματος. Ο άξονας του αγωγού είναι κατά τη διεύθυνση XX' , ενώ οι διευθύνσεις YY' και ZZ' αντιστοιχούν στον εγκάρσιο και στον κατακόρυφο άξονα, αντίστοιχα. Στο μεσαίο τμήμα του αγωγού μήκους 240 m, που αντιστοιχεί στη ζώνη κατολίσθησης δημιουργούνται 480 στοιχεία PIPE31 μήκους 0.5 m έκαστο.

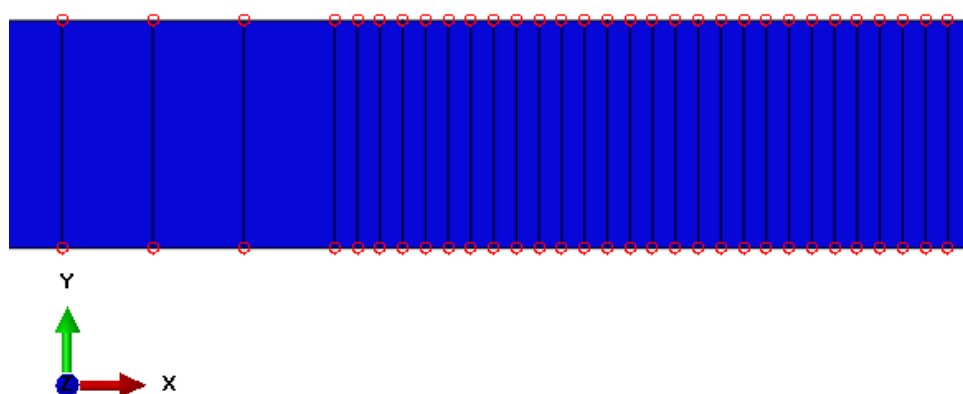
Στο κάθε τμήμα μήκους $(500 - B/2)$ m εκατέρωθεν της ζώνης κατολίσθησης, όπου αναπτύσσονται ζώνες κάμψης, δημιουργούνται 260 στοιχεία PIPE31 μήκους 0.5m έκαστο. Τέλος, στην κάθε προέκταση του αγωγού εκατέρωθεν της ζώνης κατολίσθησης μήκους 1000 m δημιουργούνται 500 στοιχεία PIPE31 μήκους 2m έκαστο. Η διακριτοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7. Τα άκρα του αγωγού πακτώνονται πλήρως, ενώ λόγω συμμετρίας επιλύεται ο μισός αγωγός. Στην περίπτωση της μη-συμμετρικής επιβολής της εγκάρσιας δύναμης της κατολίσθησης, δηλαδή όταν για παράδειγμα η κατολίσθηση επιβάλλεται με γωνία (θ) ή όταν είναι κεκλιμένος ο πυθμένας, τότε επιλύεται ολόκληρος ο αγωγός.



Σχήμα 5.7: Απεικόνιση των τριών τμημάτων του αγωγού από το μέσον μέχρι το ένα άκρο του.



Σχήμα 5.7: Περιοχή πύκνωσης/αραίωσης στοιχείων PIPE31.



Σχήμα 5.8: Η ζώνη κατολίσθησης με τα στοιχεία προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού (PSI)

Η αλληλεπίδραση του αγωγού με το έδαφος προσομοιώνεται με τη χρήση στοιχείων αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού (PSI elements), δημιουργώντας ένα για κάθε στοιχείο του αγωγού. Τα Σχήματα 5.7 και 5.8 απεικονίζουν την προσομοίωση του αγωγού στο περιβάλλον του ABAQUS. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται τα στοιχεία PIPE σε ένα

σημείο που αλλάζει το μέγεθος των στοιχείων. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα στοιχεία PSI στην ίδια θέση.

5.2.2 Στοιχεία Προσομοίωσης Αγωγού

Αρχικά, όσον αφορά τις διαστάσεις της διατομής του αγωγού μολονότι η εξωτερική διάμετρος διατηρήθηκε σταθερή $D=0.9144\text{m}$ (36 in), χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πάχη, t , όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύμφωνα με το πρότυπο API 5L Grade X56, X60 και X65 και οι ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Τέλος, όσον αφορά τις εσωτερικές πιέσεις, οι πιέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι η εσωτερική πίεση του υποθαλάσσιου τμήματος του αγωγού TAP, δηλαδή 15000 kPa, η μισή τιμή του, δηλαδή 7500 kPa, και η πίεση για κενό αγωγό πριν την έναρξη λειτουργίας του, δηλαδή 0 kPa (TAP, 2013).

Διάμετρος, D (m)	0.9144		
Πάχος, t (m)	0.06096	0.03048	0.02032
D/t	15	30	45

Πίνακας 5.1: Λόγοι εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος του αγωγού, D/t , για τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν.

API 5L Grade	X56	X60	X65
Τάση Διαρροής, min, f_y	386 MPa	414 MPa	450 MPa
Εφελκυστική Αντοχή, min, f_u	490 MPa	517MPa	530 MPa
f_y / f_u, max	0.93	0.93	0.93
Επιμήκυνση, min	19%	19%	18 %
Μέτρο Ελαστικότητας, E	210 GPa	210 GPa	210 GPa
Λόγος Poisson, ν	0.3	0.3	0.3

Πυκνότητα, ρ	7800 kg/m ³	7800 kg/m ³	7800 kg/m ³
-------------------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες των υλικών API 5L Grade X60, X65 και X70 που χρησιμοποιήθηκαν (<http://www.api5lx.com>).

PIPE31 Elements

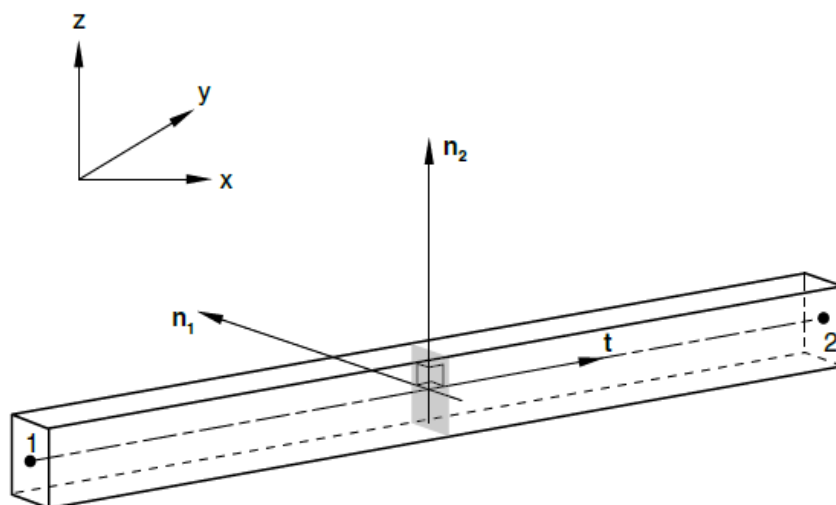
Γενικά, τα στοιχεία δοκού (beam elements) του ABAQUS έχουν την ικανότητα, μέσω κάποιων παραδοχών, να μετατρέπουν ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων σε πρόβλημα μίας διάστασης. Στα στοιχεία αυτά θεωρείται ότι όλες οι παραμορφώσεις κατά μήκος τους μπορούν να υπολογιστούν από μεταβλητές που είναι συναρτήσεις της θέσης ως προς τον άξονα της δοκού. Βασική προϋπόθεση για να είναι ρεαλιστικές οι εν λόγω παραδοχές είναι το μεγάλο μήκος της μίας διάστασης του προσομοιώματος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του. Η μεγάλη διάσταση του προσομοιώματος αποτελεί και τον άξονα των στοιχείων τύπου δοκού. Η απλούστερη προσέγγιση για τα στοιχεία δοκού είναι μέσω της θεωρίας Euler-Bernoulli, σύμφωνα με την οποία τα εγκάρσια επίπεδα των διατομών που ήταν αρχικά κάθετες στον άξονα της δοκού παραμένουν κάθετες και μετά την επιβολή φορτίων, δηλαδή η διατμητική παραμόρφωση θεωρείται αμελητέα. Μία άλλη προσέγγιση είναι μέσω της θεωρίας Timoshenko, η οποία επιτρέπει τη διατμητική παραμόρφωση της δοκού.

Τα στοιχεία τύπου Beam ορίζονται μέσω δύο (ή τριών) κόμβων και έχουν τρία τοπικά διανύσματα:

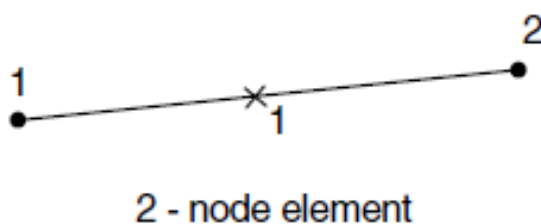
- (α) το t που έχει τη κατεύθυνση από τον πρώτο προς τον δεύτερο κόμβο της δοκού,
- (β) το n_1 που έχει κατεύθυνση πάντοτε στα αρνητικά του άξονα ZZ' εκτός αν οριστεί αλλιώς, και
- (γ) το n_2 που είναι κάθετο στα προηγούμενα δύο (βλ. Σχήμα 5.10).

Οι βαθμοί ελευθερίας στους κόμβους του στοιχείου είναι τρεις ή έξι για στοιχεία στο επίπεδο ή στον χώρο, αντίστοιχα. Για στοιχεία στο επίπεδο οι βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν στις δύο δυνατότητες κίνησης στο επίπεδο και τη μία στροφή στον κάθετο άξονα, ενώ για στοιχεία στον χώρο αντιστοιχούν στις τρεις συν τρεις δυνατότητες κίνησης και στροφής στον χώρο, αντίστοιχα. Στα στοιχεία δοκού μπορούν να ασκηθούν αξονικά, καμπτικά και στρεπτικά (μόνο για στοιχεία στον χώρο) φορτία. Ο υπολογισμός των μητρώων δυσκαμψίας αλλά και των τάσεων και παραμορφώσεων σε ένα στοιχείο δοκού γίνεται μέσω των σημείων ολοκλήρωσης κατά μήκος της δοκού. Τα σημεία αυτά μπορούν να είναι ένα ή τρία για

δοκούς δύο κόμβων, ή δύο για δοκούς τριών κόμβων. Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται στοιχείο δοκού δύο κόμβων με ένα σημείο ολοκλήρωσης (γραμμικό στοιχείο).

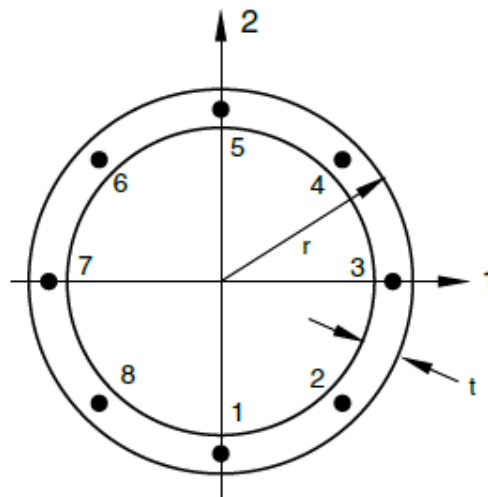


Σχήμα 5.10: Ορισμός τοπικών αξόνων στοιχείου τύπου Beam (ABAQUS, 2011).



Σχήμα 5.11: Στοιχείου Beam δύο κόμβων και ενός σημείου ολοκλήρωσης (ABAQUS, 2011).

Τα στοιχεία PIPE31 ανήκουν στην κατηγορία στοιχείων δοκού (beam elements), είναι τριών διαστάσεων, διαθέτουν ένα σημείο ολοκλήρωσης και βασίζεται στην θεωρία Timoshenko. Η διατομή τους ορίζεται μέσω της ακτίνας και του πάχους του τοιχώματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.11, περιφερειακά έχουν οκτώ σημεία ολοκλήρωσης ώστε να υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σε όλη την περίμετρο της διατομής. Εντούτοις, τα σημεία που εξάγονται τα αποτελέσματα είναι αυτά που βρίσκονται στους κύριους άξονες της διατομής, δηλαδή τα 1, 3, 5 και 7 του Σχήματος 5.12.



Σχήμα 5.12: Διατομή και σημεία ολοκλήρωσης στοιχείου Pipe (ABAQUS, 2011).

Στοιχεία Προσομοίωσης Αλληλεπίδρασης Εδάφους - Αγωγού

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού είναι τα Pipe-Soil Interaction elements (PSI24). Αυτά τα στοιχεία αποτελούνται από τέσσερις κόμβους και έχουν βαθμό ελευθερίας μόνο ως προς τη μετατόπιση στους κόμβους τους. Η μια πλευρά, ή αλλιώς άκρο, του κάθε στοιχείου PSI έχει κοινό κόμβο με το αντίστοιχο στοιχείο του αγωγού (pipe element) που προσομοιώνει τον αγωγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Οι κόμβοι στο άλλο άκρο αντιπροσωπεύουν μια ξεχωριστή επιφάνεια, δηλαδή την επιφάνεια του εδάφους, και χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την κίνηση του εδάφους μέσω κατάλληλων συνοριακών συνθηκών.

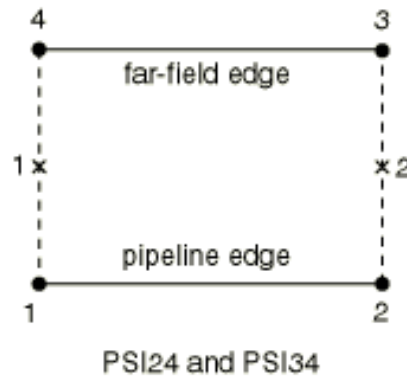
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα στοιχεία PSI δεν διακριτοποιούν το πραγματικό χωρίο του περιβάλλοντος εδάφους, αλλά την αλληλεπίδραση αυτού με τον αγωγό. Η παραμόρφωση του στοιχείου PSI χαρακτηρίζεται από τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των δύο άκρων του στοιχείου. Όταν το στοιχείο δέχεται τις σχετικές μετατοπίσεις αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων στους κόμβους του αγωγού. Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να είναι γραμμικές (ελαστικές) ή μη-γραμμικές (ελαστοπλαστικές). Οι θετικές παραμορφώσεις ορίζονται ως εξής:

$$\varepsilon_{ii} = \Delta u \cdot e_i \quad (5.1)$$

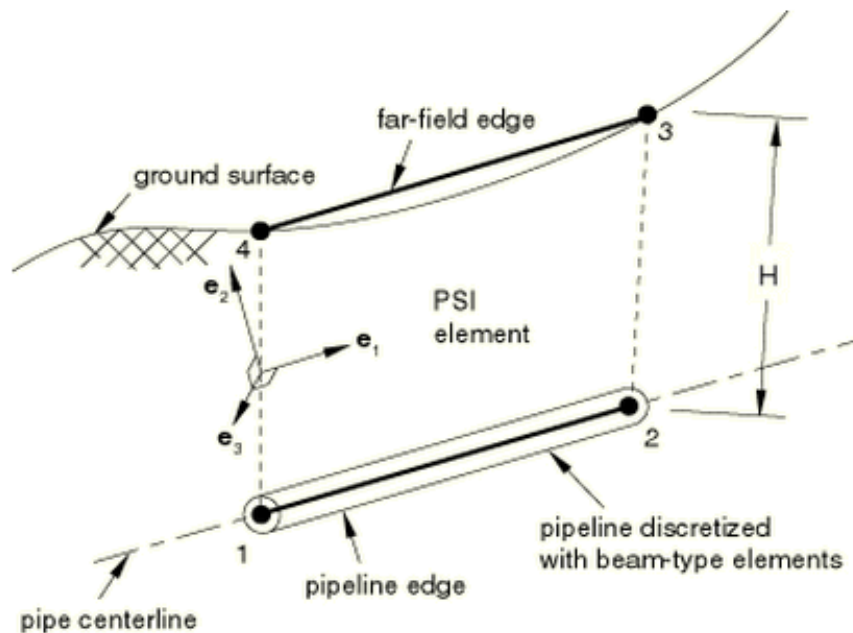
Η σχετική μετατόπιση ισούται με τη διαφορά μεταξύ των μετατοπίσεων των δύο άκρων (οι μετατοπίσεις της απομακρυσμένης περιοχής και οι μετατοπίσεις του αγωγού) και ορίζεται ως εξής:

$$\Delta u = u^f - u^p \quad (5.2)$$

όπου ο δείκτης f αναφέρεται στην απομακρυσμένη επιφάνεια (far-field) και ο δείκτης p στον αγωγό (pipeline). Ο δείκτης i στη σχέση (5.1) αναφέρεται στις τρεις κατευθύνσεις σε περίπτωση τρισδιάστατου στοιχείου που στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν χρησιμοποιείται, αφού χρησιμοποιούνται μόνο εντός πεδίου παραμορφώσεις. Τα στοιχεία PSI χρησιμοποιήθηκαν κατά μήκος όλου του αγωγού και ορίζονται μεταξύ τεσσάρων κόμβων, εκ των οποίων οι δυο είναι κόμβοι του αγωγού και αλληλεπιδρούν σε μία κάθετη μεταξύ τους διεύθυνση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Οι αποστάσεις μεταξύ κάθε δύο κόμβων (1-4 και 2-3) επιλέχθηκαν ίσες με 50 m.



Σχήμα 5.13: Στοιχεία PSI24 και PSI34 (ABAQUS, 2011).



Σχήμα 5.14: Προσομοίωση αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού (ABAQUS, 2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

Καθώς λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της κατολίσθησης, ο αγωγός εκτίθεται σε πλευρικές φορτίσεις οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην μετατόπιση του κάθετα προς τον άξονα του, σε επιβολή ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων ή ακόμα και σε θραύση λόγω τοπικού λυγισμού στην περιοχή που γίνεται η κατολίσθηση. Προκειμένου να εξεταστούν οι βασικές παράμετροι του εξεταζόμενου προβλήματος, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.14 (2011). Αυτή η διαδικασία διεξήχθη μετά την επαλήθευση του βασικού αριθμητικού μοντέλου ως προς τις μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες του προσομοιώματος αγωγού που είχαν εξετάσει τόσο αναλυτικά όσο και αριθμητικά οι Yuan et al. (2014).

Τα προβλήματα αγωγών που βρίσκονται σε ζώνη κατολίσθησης που προσομοιώθηκαν και οι παράμετροι που εξετάστηκαν αναφέρονται αναλυτικά στο 5^ο Κεφάλαιο. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της αριθμητικής διερεύνησης των υποθαλάσσιων αγωγών από χάλυβα υπό την επίδραση των επιπτώσεων μιας κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, η πολύπαραμετρική αριθμητική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε είχε τρεις στόχους. Αρχικά, εξετάζεται η καταπόνηση αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου κατά τη μετακίνηση εδάφους λόγω κατολίσθησης κάθετα στον άξονα του αγωγού. Στόχος της διερεύνησης αυτής είναι να μελετηθεί η πιθανή μεταβολή της συμπεριφοράς του αγωγού για διάφορες τιμές των κυριότερων παραμέτρων, όπως το πάχος και το υλικό της διατομής, η κλίση του πυθμένα, το φορτίο και το πλάτος της κατολίσθησης. Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση της συμπεριφοράς αγωγού φυσικού αερίου όταν η κατολίσθηση που δέχεται δεν είναι κάθετη στον άξονα του υπό γωνία. Στόχος της παραπάνω διερεύνησης είναι η μελέτη διαφορετικών περιπτώσεων κατολίσθησης, καθώς και η σύγκριση

της απόκρισης του αγωγού λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι σε πραγματικές συνθήκες οι γωνίες της κατολίσθησης ποικίλουν και πρέπει να εξεταστεί το πρόβλημα υπό διάφορες συνθήκες. Τέλος, γίνεται διερεύνηση της απόκρισης αγωγού μεταφοράς πετρελαίου υπό παρόμοιες συνθήκες κατολίσθησης για διάφορες γωνίες κλίσεως εδάφους με σκοπό τη σύγκριση της απόκρισης των αγωγών ανάλογα με το περιεχόμενο τους.

6.1 Επαλήθευση υπολογιστικού προσομοιώματος

Όπως προαναφέρθηκε, η επαλήθευση της αριθμητικής προσομοίωσης γίνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της με τις αντίστοιχες αναλυτικές και αριθμητικές λύσεις του προσομοιώματος των Yuan et al. (2014). Η αναλυτική προσέγγιση βασίζεται στη θεωρητική λύση για δοκούς των Euler-Bernoulli εφαρμοσμένη σε διαφορετικά τμήματα του αγωγού ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης. Ακολουθώντας, οι άγνωστοι παράμετροι λαμβάνονται με εφαρμογή των γνωστών συνοριακών συνθηκών. Σημειώνεται ότι η αξονική τριβή παραλείπεται στα τμήματα όπου η πλευρική αντίσταση του εδάφους είναι μη μηδενική και ότι παρόλο που η αξονική τάση μεταβάλλεται κατά μήκος του αγωγού, η οριζόντια συνιστώσα της τάσης θεωρείται σταθερή. Η αριθμητική προσέγγιση είναι αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Ting, 2004). Ο αγωγός διακριτοποιείται σε μια σειρά κόμβων και στοιχείων, με τη μάζα του αγωγού να θεωρείται συγκεντρωμένη στους κόμβους. Η επιβολή της εδαφικής κίνησης στον αγωγό γίνεται σε μια σειρά από μικρά χρονικά βήματα χρόνου, dt , με σταθερές τις ιδιότητες υλικού και τις διαστάσεις σε κάθε βήμα.

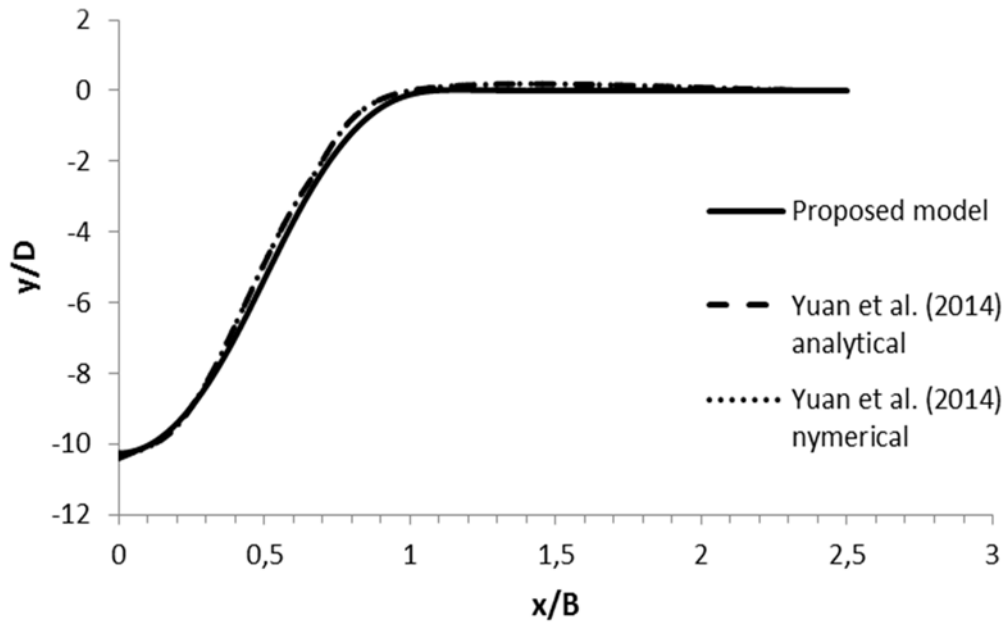
Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα του προσομοιώματος με τα προαναφερθέντα, οι ιδιότητες του αγωγού και οι συνθήκες φόρτισης που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιες με τα προσομοιώματα των Yuan et al. (2014). Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, όπου (D_{out}) και (D_{in}) είναι η εξωτερική και εσωτερική διαμέτρος, αντίστοιχα, (B) είναι το πλάτος κατολίσθησης, (q) είναι η ασκούμενη δύναμη κατολίσθησης στον αγωγό, (p_0) είναι η μέγιστη πλευρική δύναμη αντίστασης του εδάφους, (F_0) η αξονική δύναμη αντίστασης του εδάφους, το (E) είναι το μέτρο ελαστικότητας και (ν) ο λόγος Poisson.

Παράμετροι	Τιμές
D_{out} (m)	0.6
D_{in} (m)	0.55
q (kN/m)	6
P_0 (kN/m)	3
f_0 (kN/m)	0.5
E (GPa)	210
ν	0.3

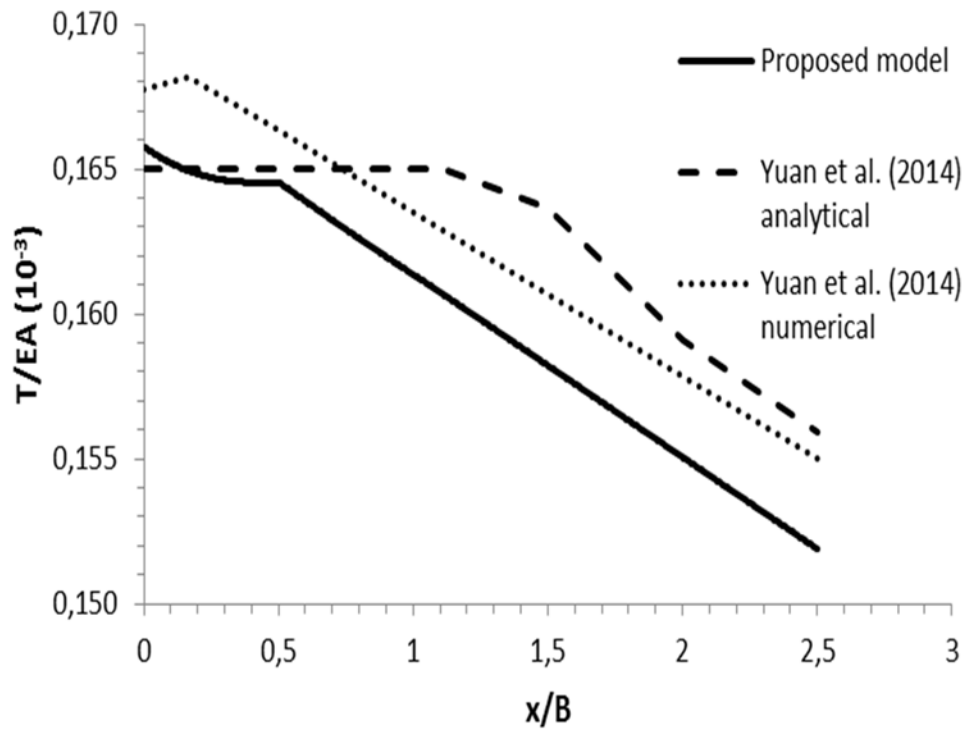
Πίνακας 6.1: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα της επαλήθευσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, η μετατόπιση του αγωγού που προκύπτει από τις τρεις προσεγγίσεις ταυτίζεται, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη μέγιστη μετατόπιση του αγωγού όσο και τη μεταβολή της μετατόπισης κατά μήκος του αγωγού. Σημειώνεται ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις των δύο αριθμητικών προσομοιωμάτων διαφέρουν το ίδιο σε σύγκριση με το αποτέλεσμα που δίνει η αναλυτική προσέγγιση.

Από την άλλη πλευρά, μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται μεταξύ των τριών προσεγγίσεων ως προς τον υπολογισμό της αξονικής τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Η αξονική τάση του αναλυτικού προσομοιώματος παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του αγωγού, επειδή η αξονική αντοχή του εδάφους δεν λαμβάνεται υπόψη, ενώ και στις δύο αριθμητικές προσομοιώσεις η αξονική τάση ελαττώνεται στο μέσον του αγωγού. Επίσης, η αξονική τάση στο μέσον του αγωγού για το αριθμητικό προσομοίωμα του Yuan et al. (2014) είναι μεγαλύτερη από την αναλυτική λύση και το προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο ABAQUS, τα οποία δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο, η αξονική τάση σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το μέσον του αγωγού του προτεινόμενου προσομοιώματος είναι μικρότερη από αυτή των άλλων δυο προσομοιωμάτων, τα οποία τείνουν να συγκλίνουν.



Σχήμα 6.1: Σύγκριση μετατοπίσεων αγωγού.



Σχήμα 6.2: Σύγκριση αξονικών τάσεων του αγωγού.

6.2 Παραμετρική ανάλυση αγωγού φυσικού αερίου υπό κατολίσθηση κάθετα στον άξονα του αγωγού

Μετά την επαλήθευση της ορθότητας της προσομοίωσης έγινε μία εκτενής διερεύνηση προκειμένου να εξεταστούν οι πιο καθοριστικοί παράγοντες για έναν αγωγό υποκείμενο σε κατολίσθηση και να διερευνηθεί η απόκριση του αγωγού για διάφορα σενάρια. Τα χαρακτηριστικά του αγωγού που χρησιμοποιούνται για αυτήν τη διερεύνηση ταυτίζονται με αυτά του υποθαλάσσιου τμήματος του αγωγού Trans Adriatic Pipeline (TAP). Ο αγωγός TAP, ο οποίος αναφέρεται και στο 2° Κεφάλαιο, είναι ένας υπό κατασκευή αγωγός ο οποίος διασχίζει τη σεισμικά ενεργή περιοχή της Αδριατικής και ως εκ τούτου είναι πιθανόν να αντιμετωπίσει υποβρύχιες κατολισθήσεις. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για το βασικό προσομοίωμα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2, όπου B είναι το πλάτος της κατολίσθησης, t είναι το πάχος του αγωγού, F_y είναι η τάση διαρροής για την ποιότητα του χάλυβα X60, φ είναι η κλίση του πυθμένα, P_{in} είναι η εσωτερική πίεση του φυσικού αερίου και P_{ext} είναι η εξωτερική πίεση του νερού για περίπου 200 m βάθος. Το συνολικό μήκος του αγωγού, οι συνοριακές συνθήκες και το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση έχουν περιγραφεί στο 5° Κεφάλαιο.

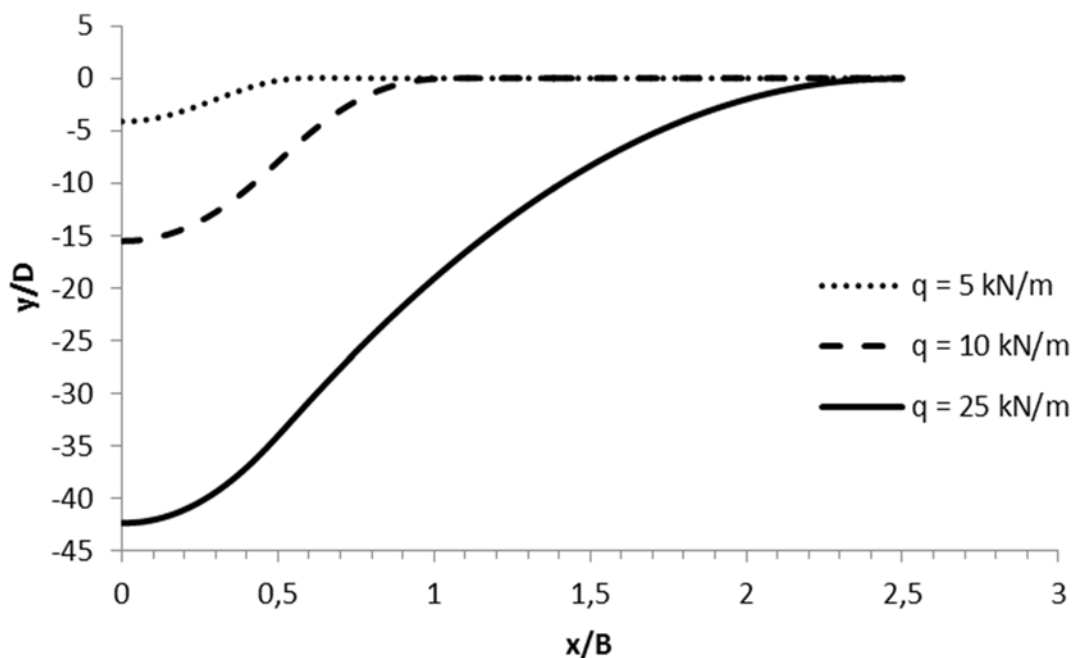
Παράμετροι	Τιμές
B (m)	240
D_{out} (m)	0.9144
D/t	30
q (kN/m)	25
P_0 (kN/m)	5
f_0 (kN/m)	1.5
E (GPa)	210
ν	0.3
F_y (MPa)	414
φ (°)	0
P_{in} (kPa)	15000
P_{ext} (kPa)	2000

Πίνακας 6.2: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική μελέτη.

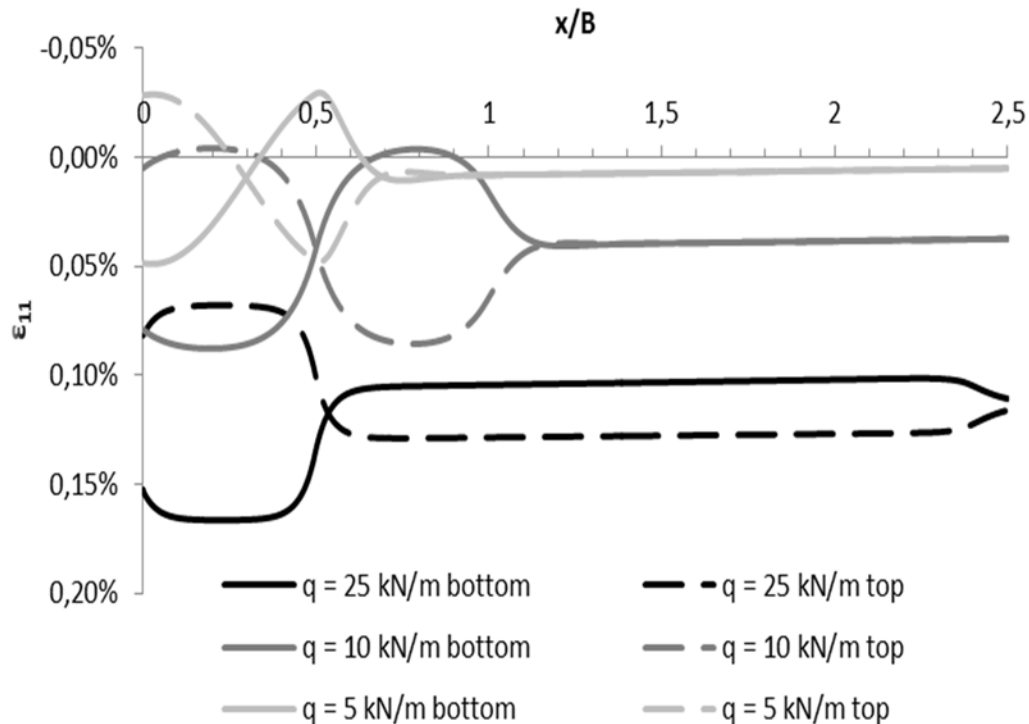
6.2.1 Δύναμη Κατολίσθησής

Οι δυνάμεις μιας κατολίσθησης είναι είτε λόγω του βάρους του εδάφους ή του βράχου που κινείται παράλληλα με την πλαγιά, ή το βάρος που προσπαθεί να περιστρέψει το υλικό της πλαγιάς, ή κάποια σεισμική δόνηση. Οι κινητήριες δυνάμεις αυξάνονται με την αύξηση της κλίσης και της πυκνότητας των βράχων και, στην περίπτωση περιστροφικών βλαβών, με το ύψος της πλαγιάς.

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της δύναμης κατολίσθησης πάνω στον αγωγό, χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές δυνάμεις: $q=5 \text{ kN/m}$, $q=10 \text{ kN/m}$ και $q=25 \text{ kN/m}$. Σε όλες τις περιπτώσεις, η δύναμη αντίστασης είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη κατά μήκος του αγωγού στην περιοχή της κατολίσθησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, μεγαλύτερα φορτία κατολίσθησης οδηγούν σε μεγαλύτερες πλευρικές κανονικοποιημένες μετατοπίσεις, y/D , και ένα μεγάλο τμήμα του αγωγού μετακινείται πλευρικά. Σημειώνεται ότι η απόλυτη πλευρική μετατόπιση του αγωγού είναι μεγάλη σε κάθε περίπτωση, και πιο συγκεκριμένα 3.77, 14.19 και 38.72m για 5, 10 και 25kN/m δύναμη κατολίσθησης, αντίστοιχα. Επίσης, το μήκος του αγωγού που κινείται είναι 135, 216 και 552m, για 5, 10 και 25kN/m δύναμη κατολίσθησης, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.3: Σύγκριση μετατοπίσεων για διαφορετικά φορτία κατολίσθησής.



Σχήμα 6.4: Σύγκριση αξονικών τάσεων για διαφορετικά φορτία κατολίσθησης.

Η αστοχία του αγωγού είναι ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο συνήθως εξετάζεται βάσει παραμορφώσεων αντί τάσεων. Επίσης, η πλευρική μετακίνηση του αγωγού δημιούργησε καμπτικές παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία κατά μήκος του αγωγού. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται η αξονική παραμόρφωση, (ε_{11}), τόσο στο κάτω όσο και στο πάνω της διατομής του αγωγού για να διερευνηθούν οι πιθανότητες αστοχίας για κάθε περίπτωση.

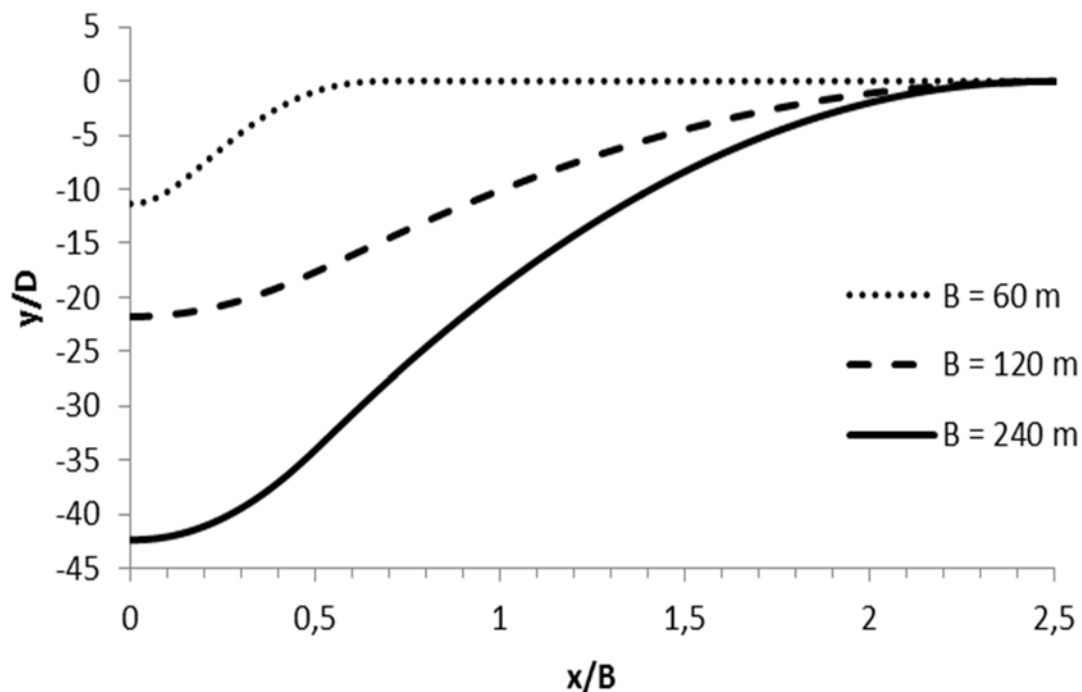
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 (βλ. Σχήμα 5.1 για των ορισμών των σημείων ανάντι και κατάντι (bottom-top) της κατολίσθησης, στα οποία στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η απόκριση του αγωγού για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν), το κάτω (bottom) μέρος παρουσιάζει μέγιστη παραμόρφωση στο μέσον του αγωγού και ελάχιστη μετά την περιοχή της κατολίσθησης, ενώ το επάνω (top) μέρος του αγωγού παρουσιάζει τα ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα:

- ✓ Για $q = 25 \text{ kN/m}$ και τα δύο μέρη του αγωγού παρουσιάζουν εφελκυσμό, ενώ η κατάσταση εξομαλύνεται γρήγορα μετά την κατολίσθηση ($x/B = 0.5$).
- ✓ Για $q = 10 \text{ kN/m}$, το πάνω και το κάτω μέρος εμφανίζουν μια ελάχιστη και μέγιστη τιμή παραμόρφωσης αντίστοιχα, σε απόσταση $x/B = 0.75$ μετά την κατολίσθηση.

- ✓ Τέλος, για $q=5\text{kN/m}$, το πάνω και το κάτω μέρος εμφανίζουν μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή παραμόρφωσης αντίστοιχα, στο τέλος της κατολίσθησης, ενώ θλιπτικές παραμορφώσεις εμφανίζονται τόσο στο μέσον του αγωγού όσο και στο τέλος της κατολίσθησης. Σημειώνεται ότι η θλίψη είναι πιο κρίσιμη από ότι ο εφελκυσμός λόγω των τοπικών φαινομένων λυγισμού που προκαλούνται στους λεπτότοιχους μεταλλικούς αγωγούς.

6.2.2 Πλάτος Κατολίσθησης

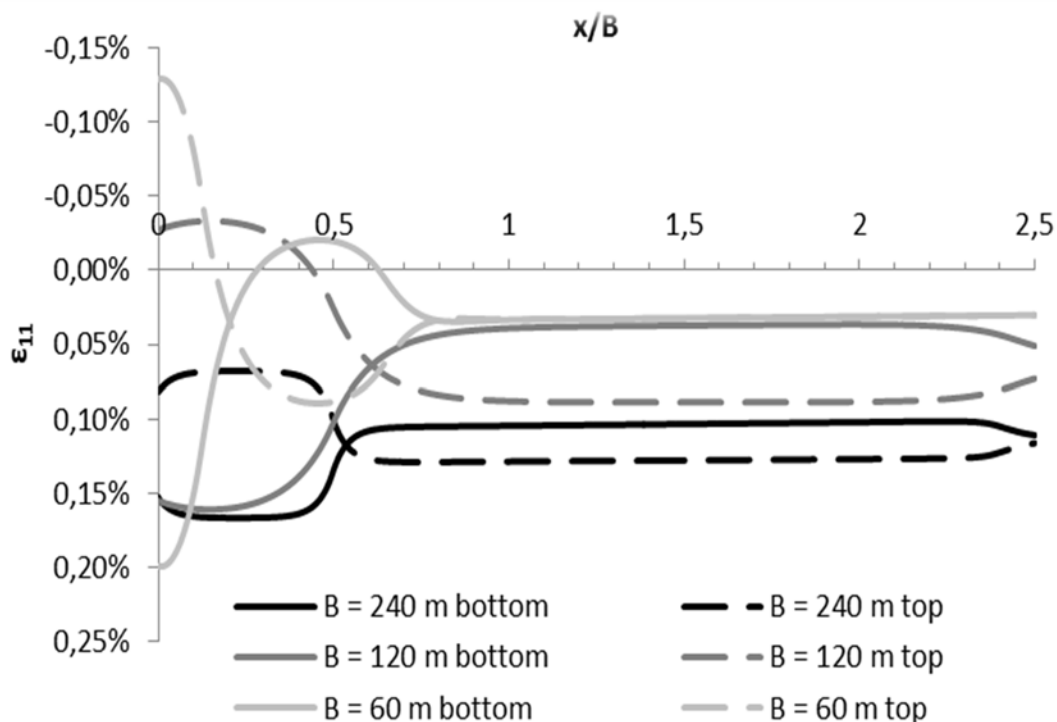
Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πλάτους της κατολίσθησης στον αγωγό, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά πλάτη: $B=60\text{m}$, $B=120\text{m}$ και $B=240\text{m}$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5, μεγαλύτερο πλάτος οδηγεί στην εμφάνιση μεγαλύτερων μετατοπίσεων y/D , ενώ το τμήμα του αγωγού που μετατοπίζεται παραμένει σταθερό. Η απόλυτη πλευρική κίνηση του αγωγού είναι μεγάλη σε κάθε περίπτωση, και πιο συγκεκριμένα 10.37, 19.91 και 38.72m για 60, 120 και 240m πλάτος της ζώνης κατολίσθησης, αντίστοιχα. Το μήκος του αγωγού που μετακινείται πλαγίως είναι περίπου 552m για όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 6.5: Σύγκριση μετατοπίσεων του αγωγού για διαφορετικά πλάτη κατολισθήσεως.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6, το κάτω μέρος του αγωγού παρουσιάζει μέγιστη παραμόρφωση στο μέσον του αγωγού και ελάχιστη μετά την περιοχή της κατολίσθησης, ενώ το επάνω μέρος του αγωγού εμφανίζει τα ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα:

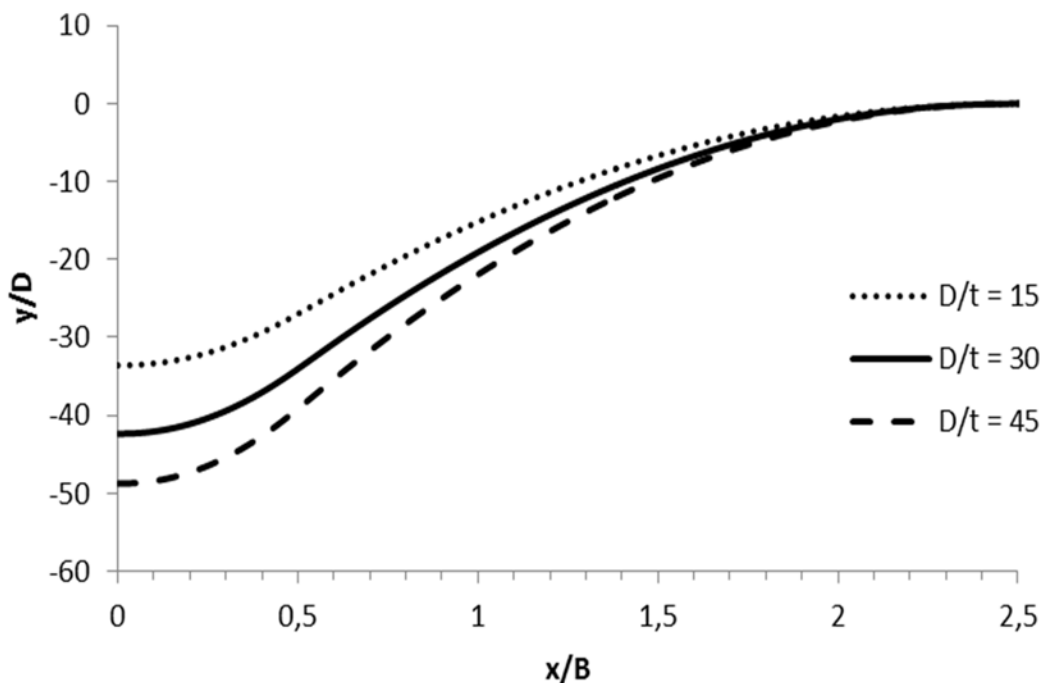
- ✓ Για $B = 240\text{m}$ και τα δυο μέρη του αγωγού εφελκύνονται και η κατάσταση εξομαλύνεται γρήγορα μετά την κατολίσθηση ($x/B = 0.5$).
- ✓ Για $B = 120\text{m}$, αν και στα δυο μέρη του αγωγού οι παραμορφώσεις ομαλοποιούνται γρήγορα μετά την κατολίσθηση, παρουσιάζονται θλιπτικές παραμορφώσεις στο μέσον του αγωγού και το τέλος της ζώνης κατολίσθησης για το επάνω και το κάτω μέρος του αγωγού αντίστοιχα.
- ✓ Τέλος, για $B = 60\text{m}$, οι θλιπτικές παραμορφώσεις αυξάνονται ταχέως στο πάνω μέρος του αγωγού. Παρά το γεγονός ότι η συνολική δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι μικρότερη, η κατάσταση που έχει δημιουργηθεί είναι πιο κρίσιμη από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, λόγω των τοπικών φαινομένων λυγισμού που ενδέχεται να προκληθούν. Γι' αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν ένας αγωγός τοποθετηθεί για παράδειγμα σε στενές υποθαλάσσιες κοιλάδες, όπου μπορεί να του ασκηθούν κατολισθήσεις σε μικρά πλάτη.



Σχήμα 6.6: Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων για διαφορετικά πλάτη κατολίσθησης.

6.2.3 Διατομή αγωγού

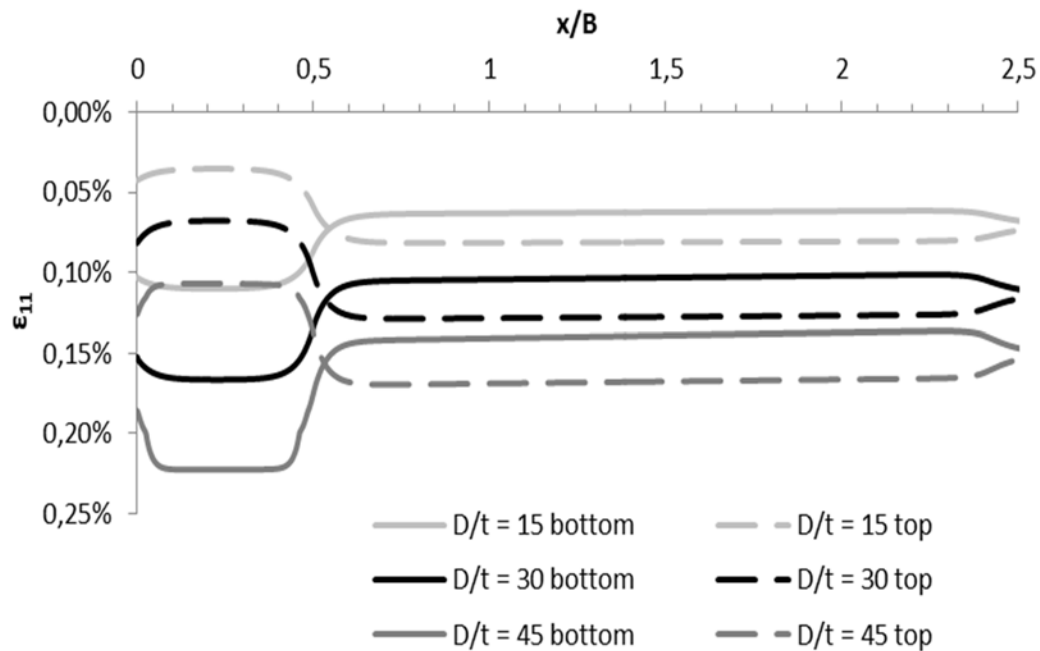
Για να εξεταστεί η επιρροή της διατομής του αγωγού και πιο συγκεκριμένα ο λόγος της διαμέτρου ως προς πάχος του (D/t), χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί λόγοι: $D/t = 15$, $D/t = 30$ και $D/t = 45$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού είναι σταθερή και ίση με 0.9144m, μεγαλύτερος λόγος D/t αντιστοιχεί σε μικρότερο πάχος αγωγού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7, μεγαλύτερος λόγος D/t δίνει αποτελέσματα με μεγαλύτερες πλευρικές μετατοπίσεις, y/D , ενώ το τμήμα του αγωγού που μετατοπίζεται παραμένει σταθερό. Η απόλυτη πλευρική κίνηση του αγωγού είναι μεγάλη σε κάθε περίπτωση, και πιο συγκεκριμένα 30.7, 38.72 και 44.55 m για λόγους $D/t = 15$, 30 και 45, αντίστοιχα. Το μήκος του αγωγού που μετακινείται είναι 552m για όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 6.7: Σύγκριση μετατοπίσεων για διαφορετικές διατομές αγωγού.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8, το κάτω μέρος του αγωγού παρουσιάζει μέγιστη παραμόρφωση στο μέσον του αγωγού και ελάχιστη μετά την περιοχή κατολίσθησης, ενώ το άνω μέρος του αγωγού παρουσιάζει την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά. Σε όλες τις περιπτώσεις και τα δυο μέρη του αγωγού εφελκύνονται και οι τιμές των παραμορφώσεων ομαλοποιούνται γρήγορα μετά την κατολίσθηση ($x/B = 0.5$). Η μόνη διαφορά μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος D/t τόσο μεγαλύτερες είναι οι

εφελκυστικές παραμορφώσεις που προκύπτουν, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί εύκολα ότι οφείλεται στη μείωση της διατομής του αγωγού.

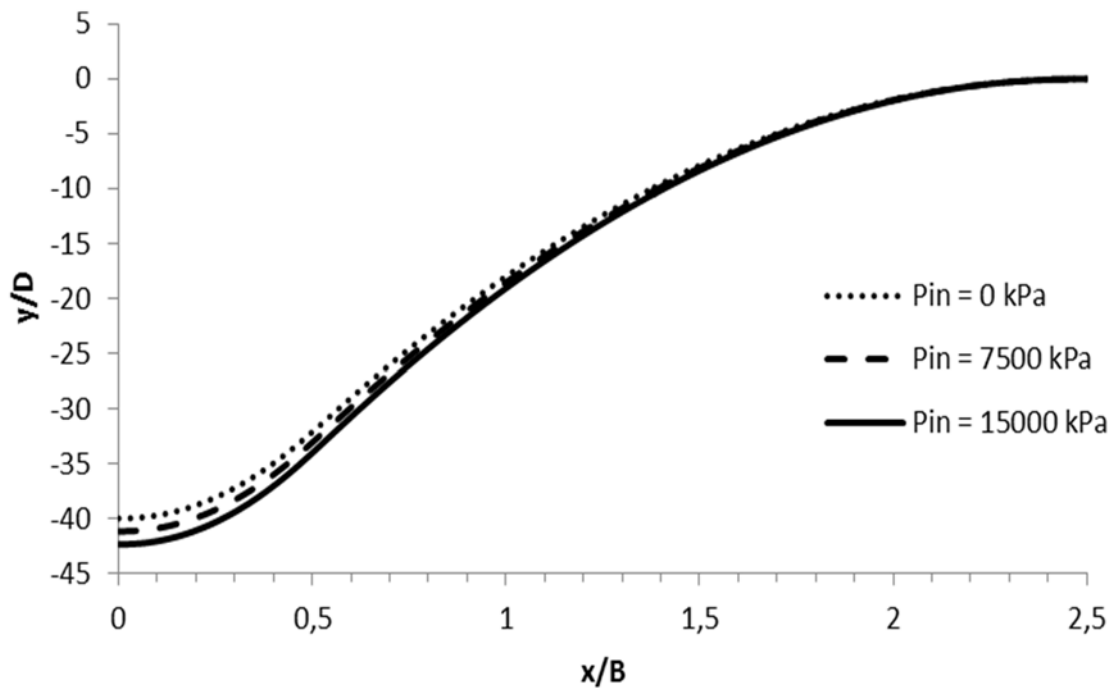


Σχήμα 6.8: Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων για διαφορετικές διατομές.

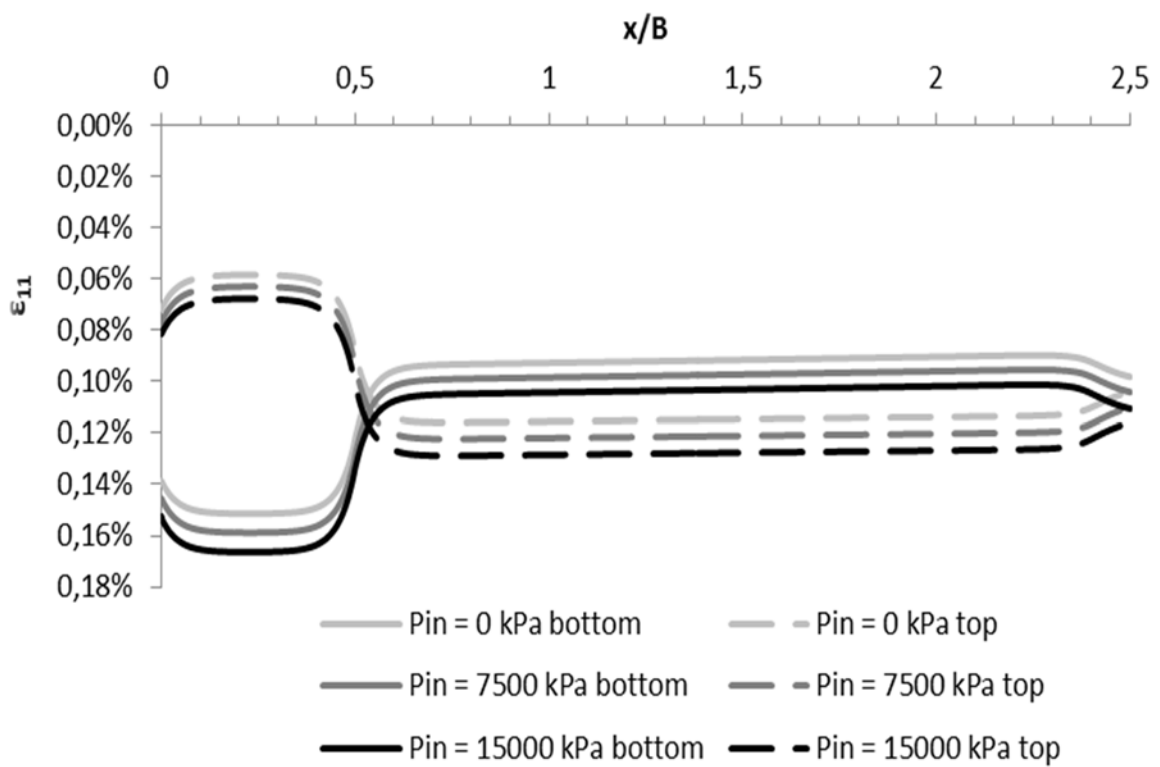
6.2.4 Εσωτερική Πίεση

Για να μελετηθεί η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στον αγωγό, χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές τιμές: $P_{in} = 0$ MPa, $P_{in} = 7.5$ MPa και $P_{in} = 15$ MPa. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9, μεγαλύτερη εσωτερική πίεση οδηγεί σε μεγαλύτερες πλευρικές μετατοπίσεις, y/D , ενώ το τμήμα του αγωγού που μετατοπίζεται παραμένει το ίδιο. Η απόλυτη πλευρική κίνηση του αγωγού είναι μεγάλη σε κάθε περίπτωση, και πιο συγκεκριμένα 36.56, 38.72 και 37.64 m για 0, 7.5 και 15 MPa εσωτερική πίεση, αντίστοιχα. Το μήκος του αγωγού που μετακινείται είναι και πάλι ίσο με 552 m για όλες τις περιπτώσεις.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, το κάτω μέρος του αγωγού παρουσιάζει μέγιστη παραμόρφωση στο μέσον του αγωγού και ελάχιστη μετά την περιοχή κατολίσθησης, ενώ το πάνω μέρος του αγωγού παρουσιάζει αντισυμμετρική εικόνα. Σε όλες τις περιπτώσεις, και τα δύο μέρη του αγωγού εφελκύνονται και οι τιμές των παραμορφώσεων ομαλοποιούνται γρήγορα μετά την κατολίσθηση ($x/B = 0.5$). Η μόνη διαφορά μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η εσωτερική πίεση τόσο μεγαλύτερες είναι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις.



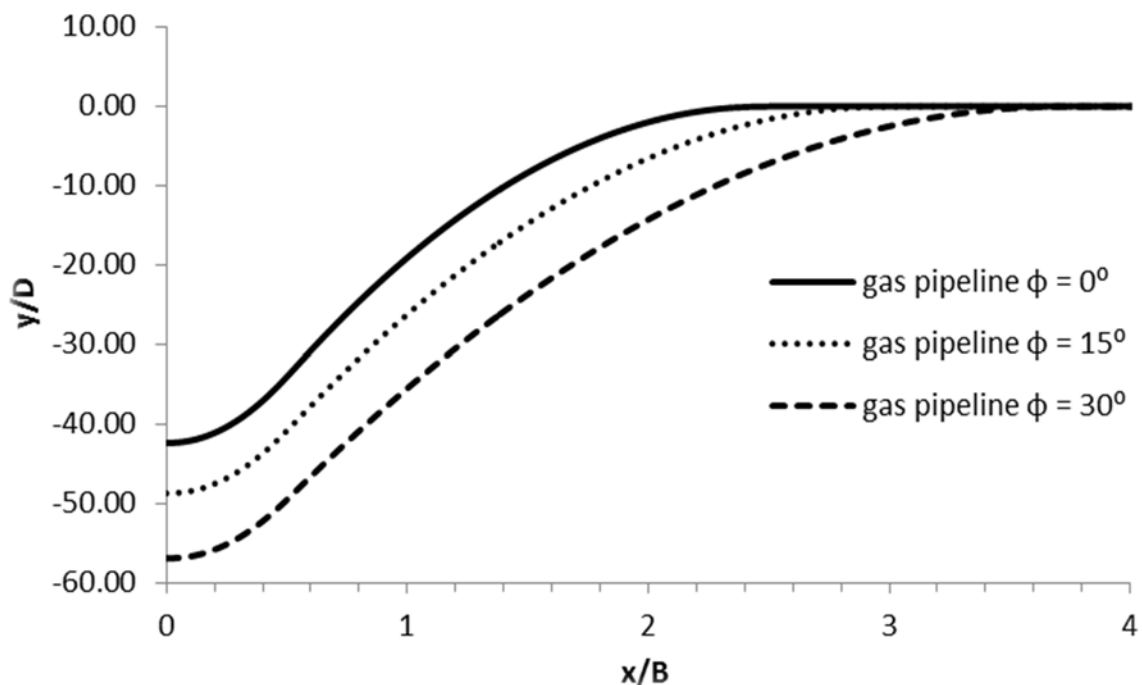
Σχήμα 6.9: Σύγκριση μετατοπίσεων αγωγού για διαφορετικές εσωτερικές πιέσεις.



Σχήμα 6.10: Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων για διαφορετικές τιμές εσωτερικής πίεσης

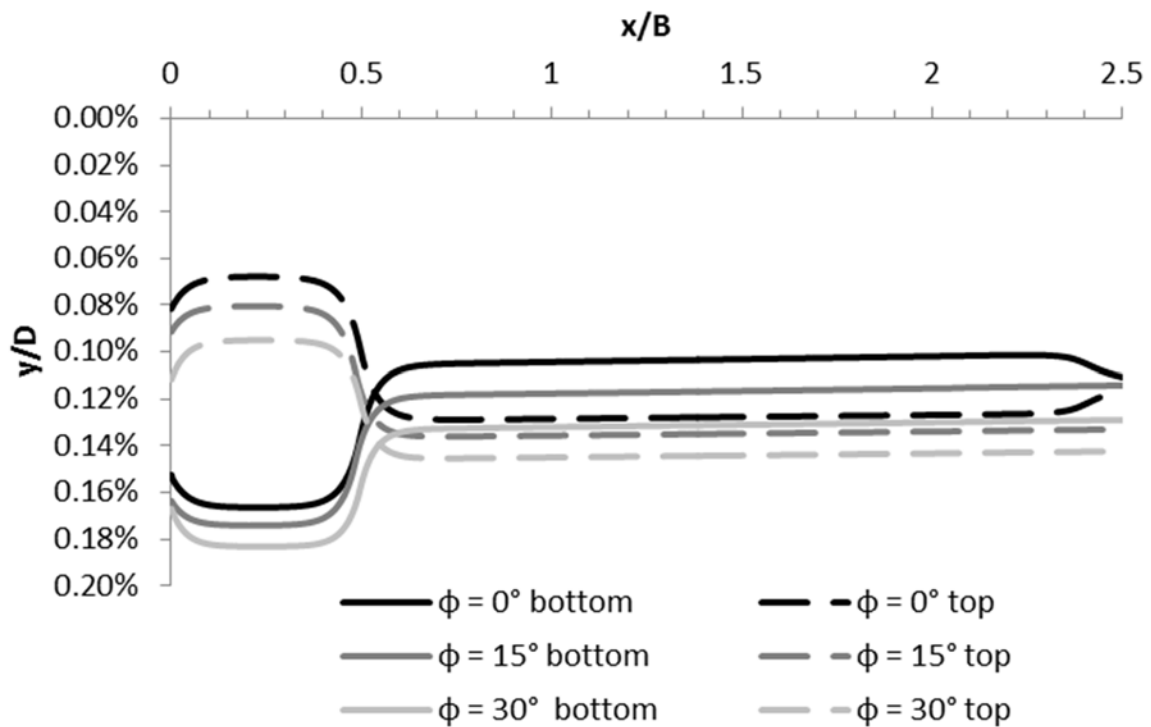
6.2.5 Γωνία κλίσης πυθμένα

Για να εξετασθεί η επιρροή της γωνία κλίσης του πυθμένα, χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές γωνίες: $\phi = 0^\circ$, $\phi = 15^\circ$ και $\phi = 30^\circ$. Σε όλες τις περιπτώσεις, η κλίση είναι κάθετη προς τον άξονα του αγωγού (βλ. Σχήμα 5.2). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, μεγαλύτερες γωνίες κλίσης οδηγούν σε μεγαλύτερες πλευρικές μετατοπίσεις, y/D , ενώ μεγαλύτερο τμήμα του αγωγού μετακινείται. Σημειώνεται ότι η απόλυτη πλευρική κίνηση του αγωγού είναι μεγάλη σε κάθε περίπτωση, και πιο συγκεκριμένα, 38.72, 44.52 και 52.02 m για 0° , 15° και 30° κλίσεις, αντίστοιχα. Επίσης, το μήκος του αγωγού που μετατοπίζεται είναι 552, 675 και 855 m, για γωνία 0, 15 και 30° , αντίστοιχα.



Σχήμα 6.11: Σύγκριση μετατοπίσεων για διαφορετικές γωνίες κλίσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12, το κάτω μέρος του αγωγού παρουσιάζει μέγιστη παραμόρφωση στο μέσον του αγωγού και ελάχιστη μετά την περιοχή της κατολίσθησης, ενώ το επάνω μέρος του αγωγού εμφανίζει την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά. Σε όλες τις περιπτώσεις, και τα δυο μέρη του αγωγού είναι σε εφελκυσμό και οι τάσεις εξομαλύνονται γρήγορα μετά την κατολίσθηση ($x/B = 0,5$). Η μόνη διαφορά μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι ότι όσο πιο απότομη είναι η κλίση του πυθμένα τόσο μεγαλύτερη είναι η εφελκυστική παραμόρφωση που προκύπτει, αφού οι συνθήκες είναι δυσμενέστερες για τον αγωγό.

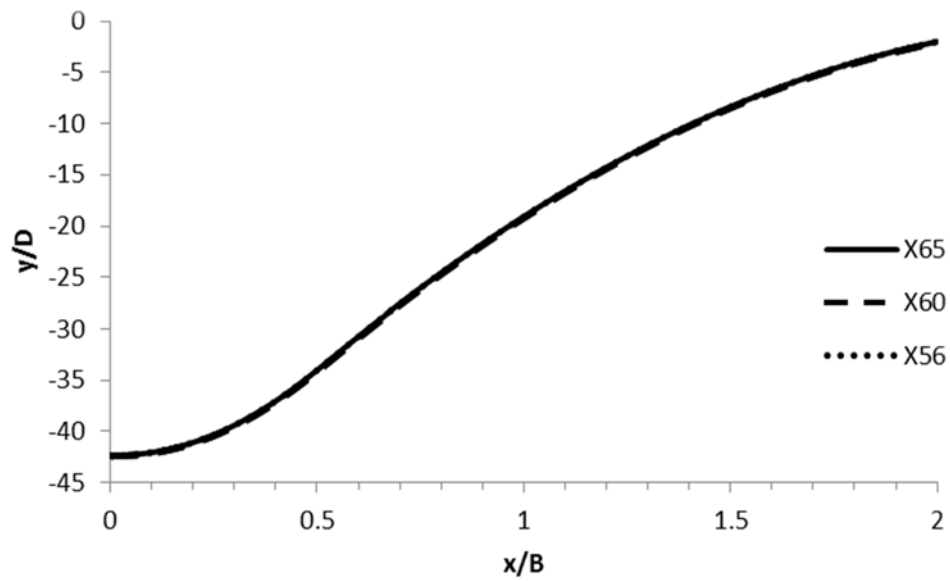


Σχήμα 6.12: Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων για διαφορετικές γωνίες κλίσης

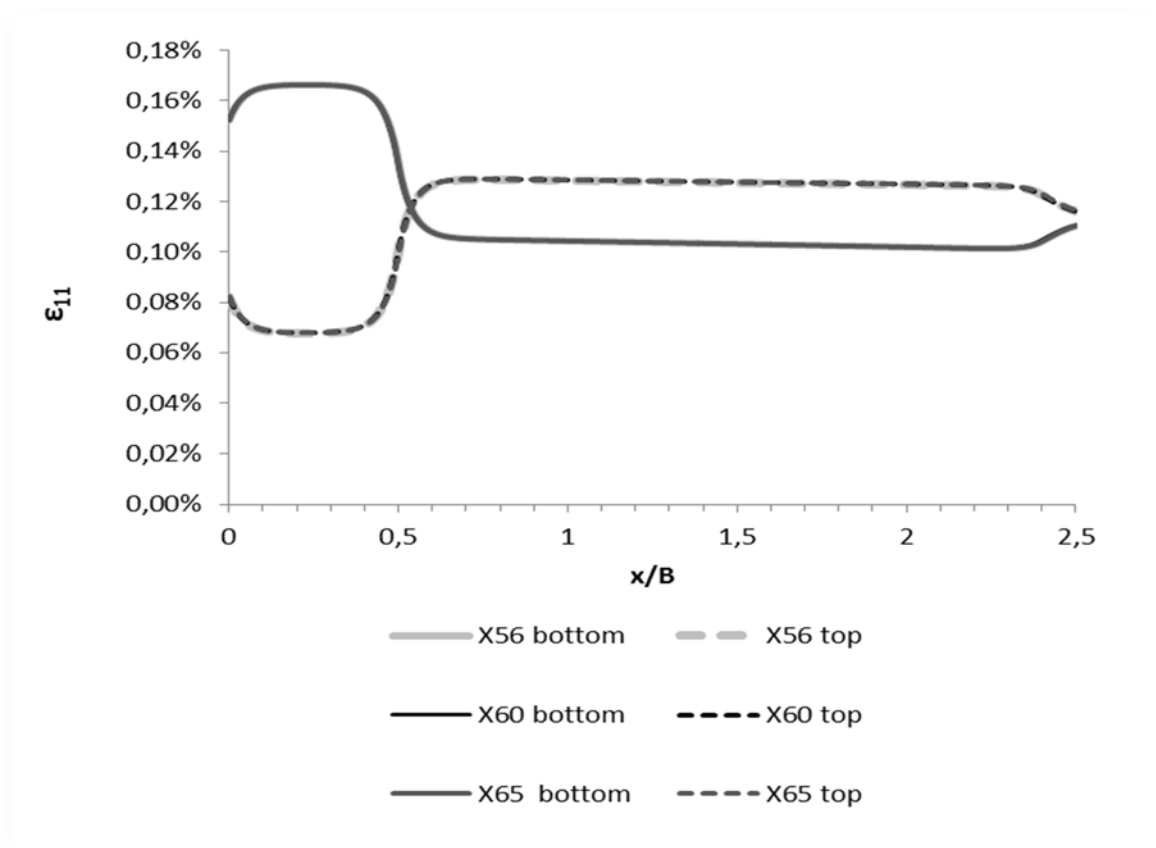
6.2.6 Υλικό Αγωγού

Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή του υλικού κατασκευής στην απόκριση του αγωγού σε κατολίσθηση κάθετα στον άξονα του, ο αγωγός εξετάστηκε για τρία είδη αντοχών του υλικού του, δηλαδή για χάλυβες ποιότητας X56, X60 και X65. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα των Σχημάτων 6.13, και 6.14 ο αγωγός παρουσιάζει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα και για τα τρία υλικά.

Αυτό συμβαίνει επειδή οι παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρές και τα τρία υλικά έχουν το ίδιο μέτρο ελαστικότητας (βλ. Πίνακα 5.2). Η αντοχή του υλικού θα έπαιζε ρόλο στην απόκριση του αγωγού εάν προέκυπταν πλαστικές παραμορφώσεις. Συνεπώς, επειδή στις συγκεκριμένες περιπτώσεις ο αγωγός δεν πλαστικοποιείται εξαιτίας της κατολίσθησης τα τρία υλικά παρουσιάζουν τα ίδια αποτελέσματα τόσο σε μετακινήσεις όσο και σε αξονικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 6.13 : Σύγκριση μετατοπίσεων για χάλυβα διαφορετικών αντοχών.

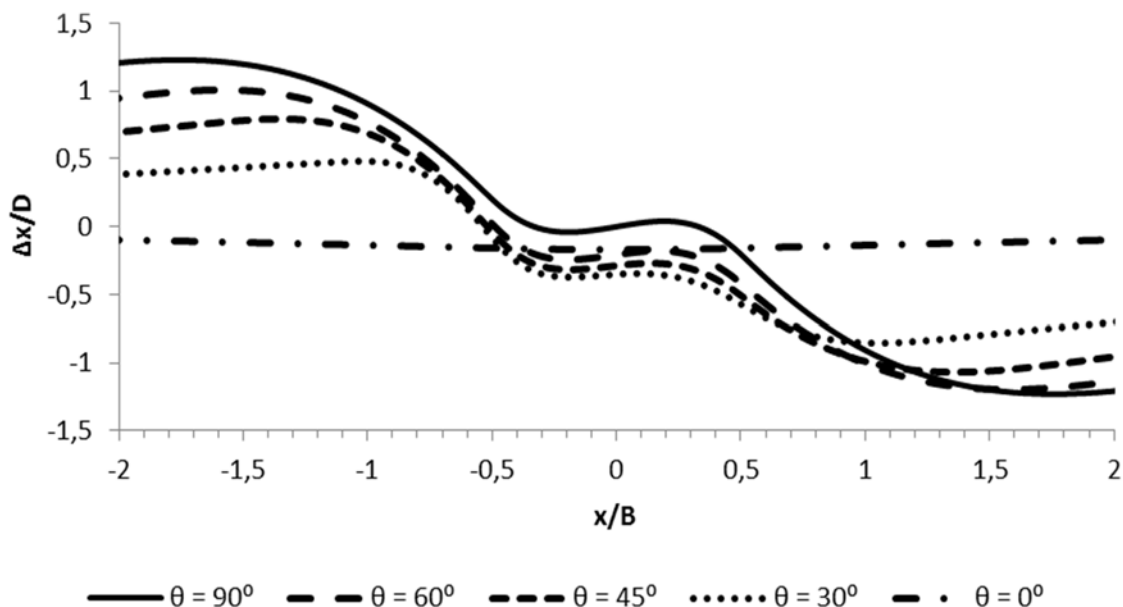


Σχήμα 6.14 : Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων για χάλυβα διαφορετικών αντοχών.

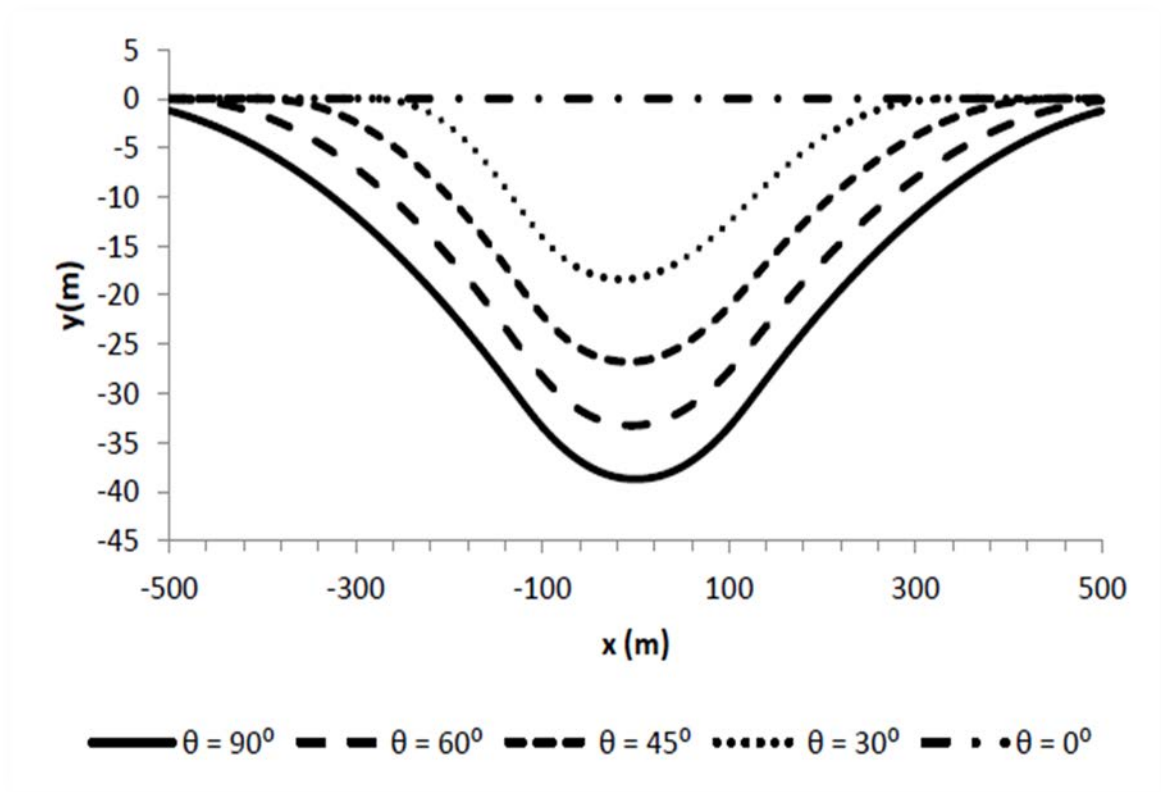
6.3 Παραμετρική ανάλυση αγωγού φυσικού αερίου για κατολίσθηση υπό γωνία

Μια δεύτερη παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε προκειμένου να εξεταστεί η απόκριση ενός υποθαλάσσιου αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου όταν η κατολίσθηση που δέχεται δεν είναι κάθετη προς τον άξονα του αγωγού αλλά έχει κλίση (θ) ίση με 0° , 30° , 45° , 60° και 90° . Όπως αναφέρθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο, επειδή το πρόβλημα δεν είναι πλέον συμμετρικό εξετάζεται όλος ο αγωγός και όχι το μισό προσομοίωμα όπως συνέβαινε στις προηγούμενες αναλύσεις.

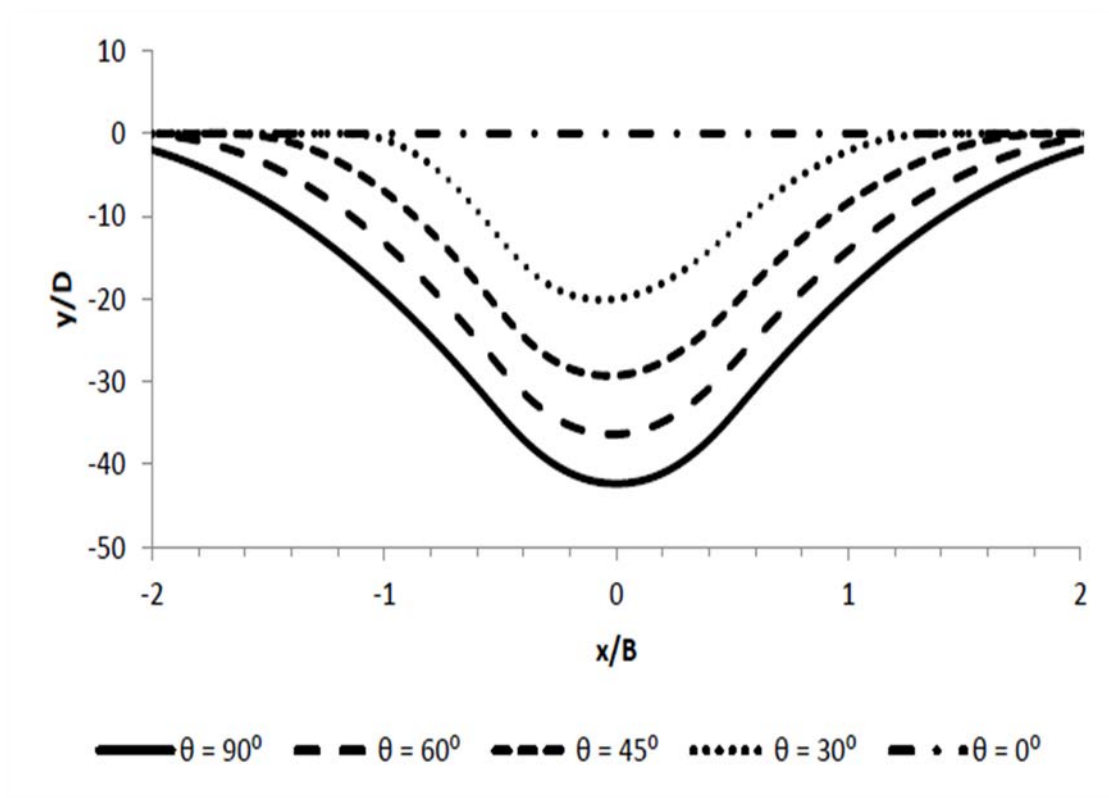
Το διάγραμμα του Σχήματος 6.15 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη μετακίνηση του αγωγού σε σχέση με το μήκος του για διάφορες γωνίες κατολίσθησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15, όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση της κατολίσθησης (θ) τόσο πιο μεγάλη είναι και η μετατόπιση. Ενώ για γωνία κατολίσθησης 0° , δηλαδή για κατολίσθηση παράλληλη με τον άξονα του αγωγού, η μετατόπιση του αγωγού στον άξονα $X'X$ είναι πολύ μικρή καθ' όλο το μήκος του αγωγού. Γενικά, παρατηρείται μια αντισυμμετρική (ως προς το μέσον του αγωγού) μεταβολή των μετακινήσεων του αγωγού. Το διάγραμμα του Σχήματος 6.16 παρουσιάζει την απόλυτη μετατόπιση του αγωγού (σε m) στην εγκάρσια διεύθυνση ως προς τον άξονα ($Y''Y$) του αγωγού. Όπως προκύπτει από το συγκεκριμένο διάγραμμα μεγαλύτερες γωνίες κατολίσθησης παρουσιάζουν μεγαλύτερες απόλυτες μετατοπίσεις, ενώ για αξονική κατολίσθηση ($\theta = 0^\circ$) η μετατόπιση είναι σχεδόν μηδενική.



Σχήμα 6.15 Σύγκριση μετακινήσεων για διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης θ .

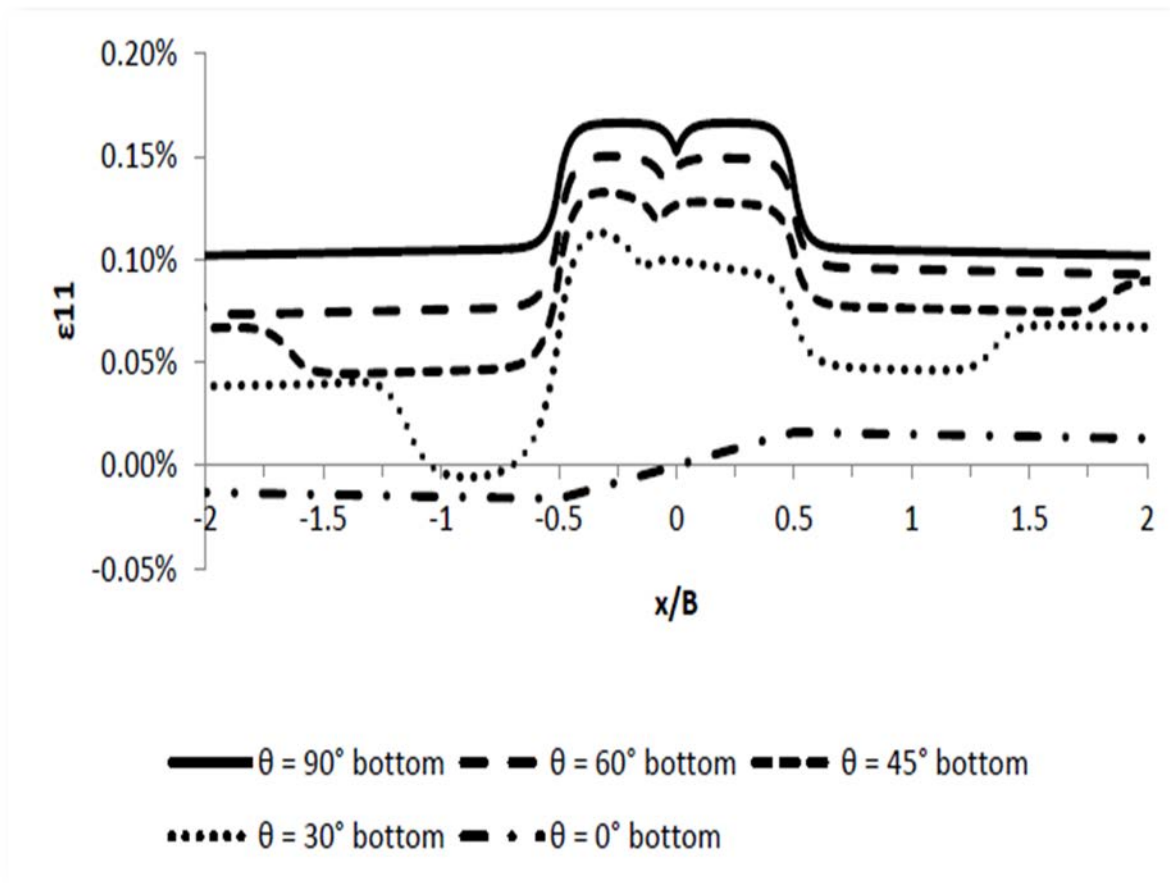


Σχήμα 6.16: Σύγκριση απόλυτων μετατοπίσεων για διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης θ .



Σχήμα 6.17: Σύγκριση μετατοπίσεων για διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης θ .

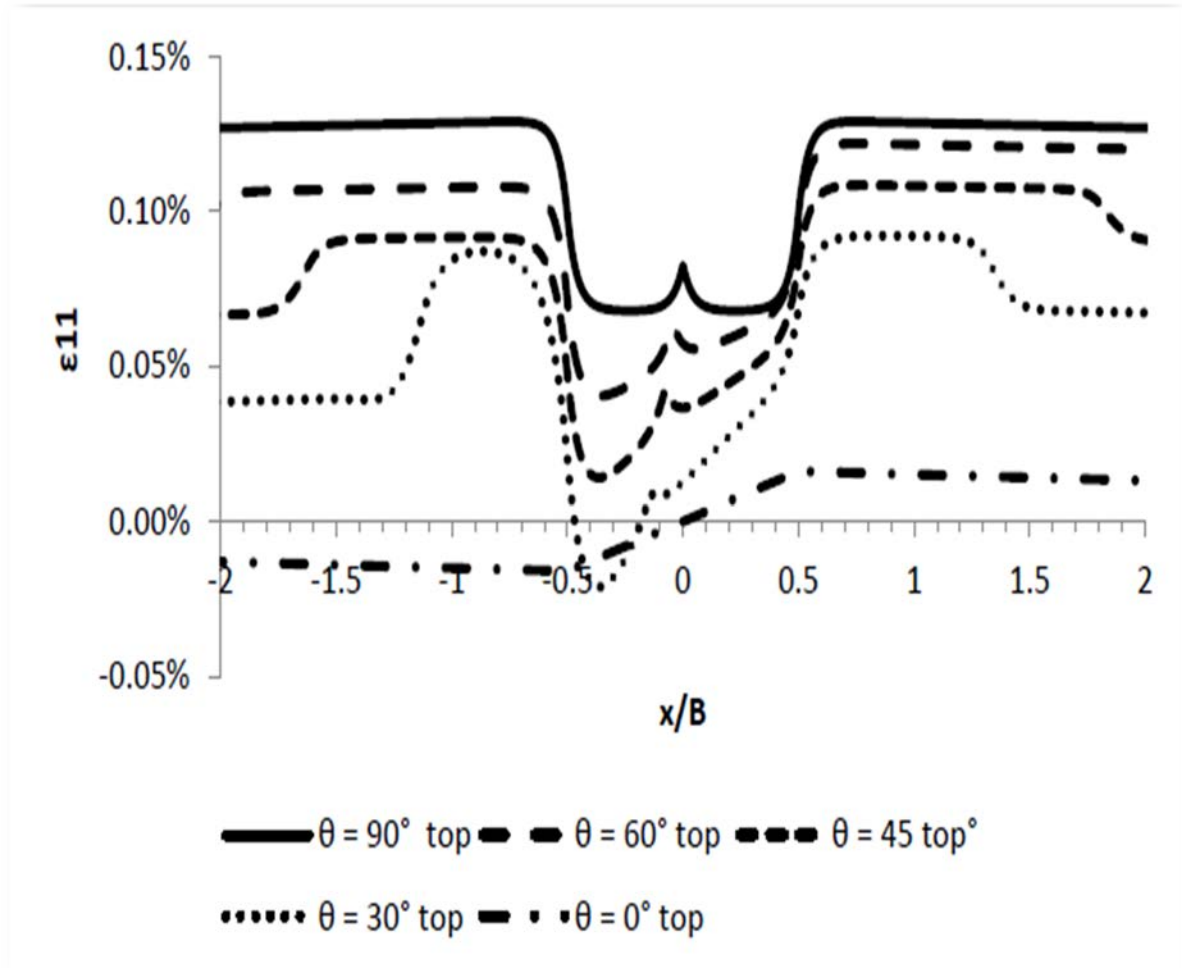
Στα Σχήματα 6.18, 6.19 και 6.20 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις του αγωγού φυσικού αερίου υποκείμενου σε κατολίσθηση υπό κλίση. Το πρώτο διάγραμμα παραμορφώσεων (Σχήμα 6.18) παρουσιάζει τις παραμορφώσεις στο κατώτερο τμήμα της διατομής του αγωγού, το δεύτερο (Σχήμα 6.19) τις αντίστοιχες στο ανώτερο τμήμα ενώ το τρίτο (Σχήμα 6.20) παρουσιάζει τις παραμορφώσεις και στα δύο τμήματα για διάφορες τιμές προσανατολισμού της κατολίσθησης (θ).



Σχήμα 6.18: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης θ στην κάτω παρειά του αγωγού.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.18 μεγαλύτερες γωνίες κατολίσθησης προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Εξαιρέση αποτελεί η μηδενική γωνία κατολίσθησης η οποία προκαλεί μια μικρή ομοιόμορφη εφελκυστική παραμόρφωση στο κάτω μέρος του αγωγού μετά το μέσον του, ενώ πριν το μέσον προκαλεί μια μικρή ομοιόμορφη θλιπτική παραμόρφωση. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι η δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι παράλληλη στον άξονα του, επομένως, δημιουργεί μία θλιβόμενη και μία εφελκυστική ζώνη εκατέρωθεν του μέσου του αγωγού. Σε αντίθεση με την ορθή γωνία

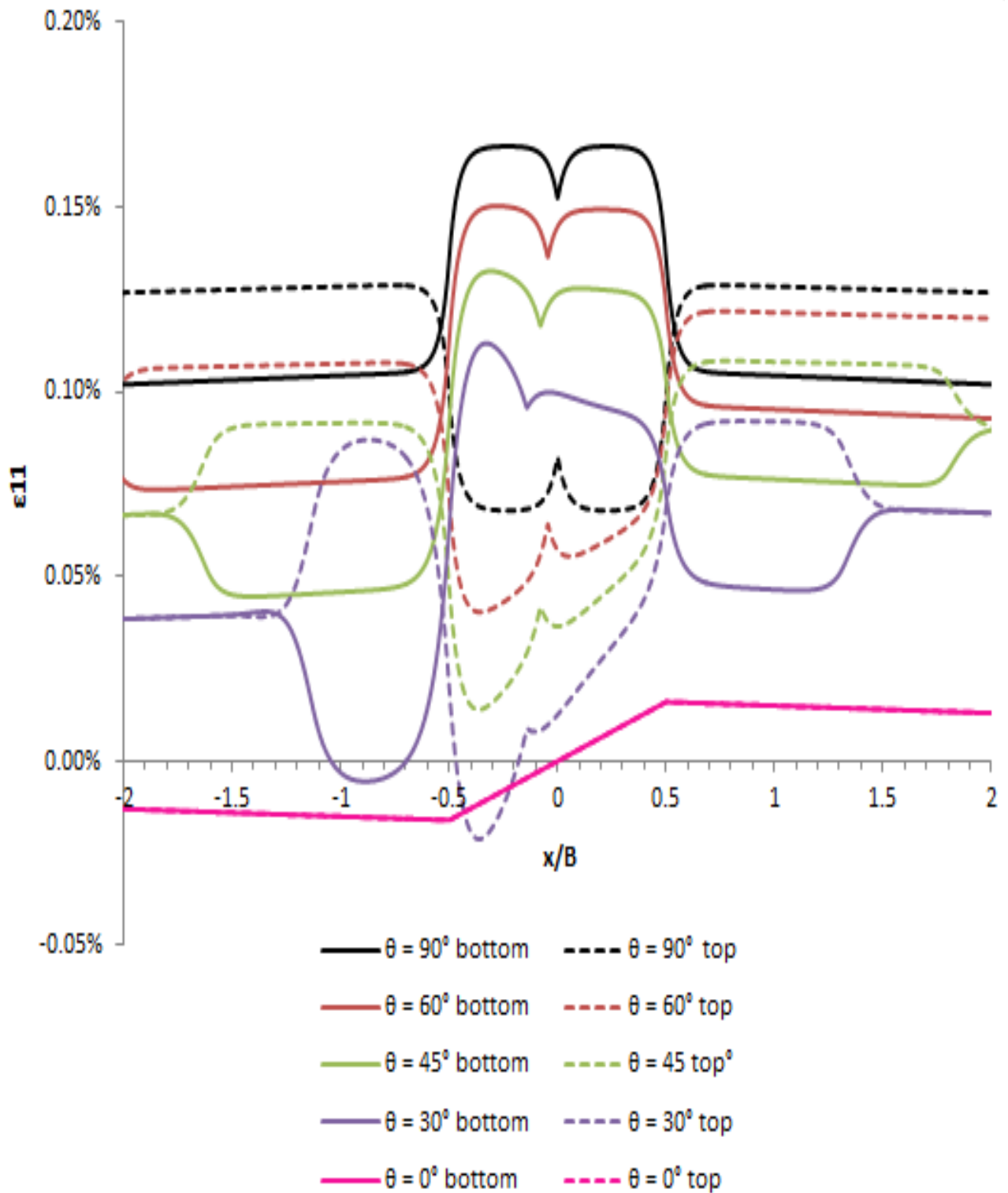
κατολίσθησης που παρουσιάζει απόλυτη συμμετρία στο διάγραμμα παραμορφώσεων η συμμετρία σταδιακά παύει να ισχύει με την μείωση της γωνίας, με χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό των 30° , όπου παρατηρείται στο κάτω μέρος του αγωγού μια συμπεριφορά αρκετά διαφορετική. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται μικρές θλιπτικές παραμορφώσεις στο αριστερό τμήμα του αγωγού.



Σχήμα 6.19: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης θ .

Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.19 γίνεται ακόμα πιο εμφανής η ασυμμετρία που παρουσιάζουν οι διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης σε σχέση με τα αποτελέσματα που δίνει η ορθή γωνία κατολίσθησης. Η παράλληλη ως προς τον άξονα του αγωγού κατολίσθησης ($\theta=0^\circ$) παρουσιάζει την ίδια ακριβώς συμπεριφορά και στις δύο πλευρές της διατομής του αγωγού όπως αναμενόταν. Όσο μικραίνει η γωνία κατολίσθησης η ασυμμετρία γίνεται όλο και πιο έντονη και όπως και στο κατώτερο σημείο του αγωγού η γωνία κατολίσθησης $\theta = 30^\circ$

είναι η μόνη που παρουσιάζει θλιπτικές παραμορφώσεις έστω και για λίγα μέτρα στο αριστερό τμήμα του αγωγού.



Σχήμα 6.20: Σύγκριση παραμορφώσεων για διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης θ στις δύο παρειές της διατομής του αγωγού.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα Σχήματα 6.18 και 6.19 συμπεραίνεται ότι η γωνία κλίσης $\theta = 30^\circ$ αποτελεί κρίσιμη γωνία καθώς σε αυτήν εμφανίζεται θλίψη τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω τμήμα του αγωγού. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία θλιβόμενης ζώνης, η οποία αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμη κατάσταση, λόγω της μικρότερης αντοχής του αγωγού σε θλίψη εξαιτίας του φαινομένου του τοπικού λυγισμού και καλό είναι να αποφεύγεται. Συμπερασματικά, γωνίες διασταύρωσης με την κατολίσθηση μικρότερες των 30° καλό είναι να αποφεύγονται.

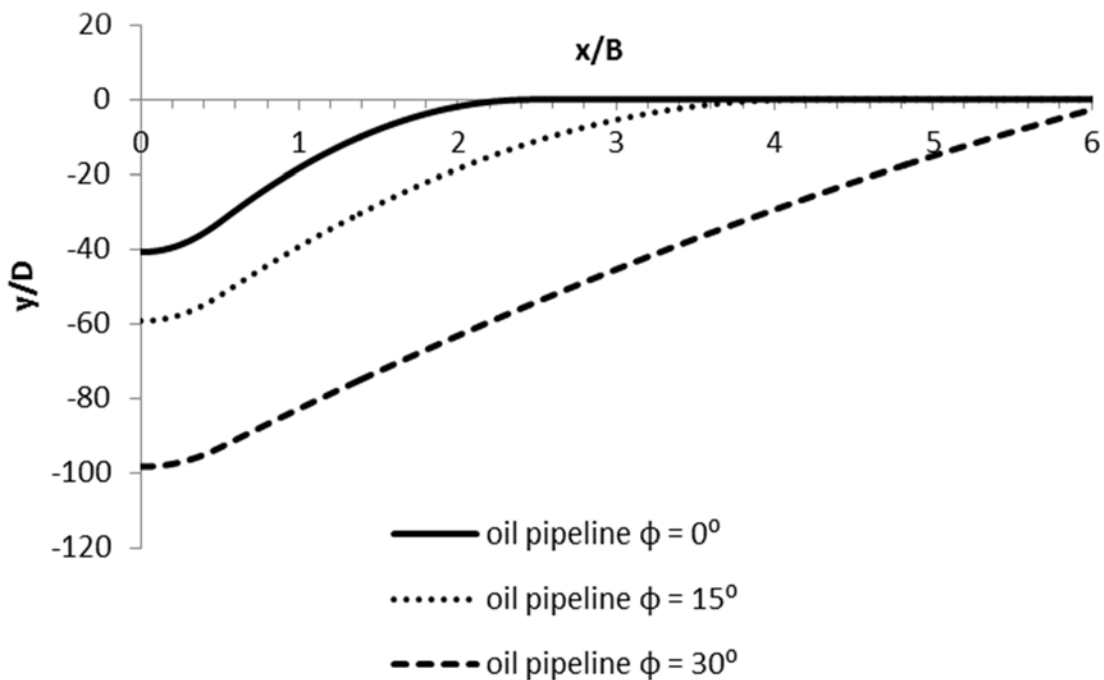
Το διάγραμμα του Σχήματος 6.20 παρουσιάζει την απόκριση των παρειών της διατομής του αγωγού, δηλαδή του ανώτερου και κατώτερου τμήματος του αγωγού σε διάφορες γωνίες κατολίσθησης συμβάλλοντας στην εξαγωγή πιο γενικών συμπερασμάτων. Πιο αναλυτικά, μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Η παράλληλη ως προς τον άξονα του αγωγού κατολίσθηση ($\theta=0$) προκαλεί ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα στα δυο εξεταζόμενα σημεία του αγωγού.
2. Όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία της κατολίσθησης τόσο μεγαλύτερη είναι η εφελκυστική παραμόρφωση που προκαλείται, γεγονός που εξηγείται λόγω της μεγαλύτερης συνιστώσας σε πλευρική φόρτιση και της μικρότερης σε αξονική.
3. Για γωνίες κατολίσθησης 30° παρατηρούνται θλιπτικές παραμορφώσεις στο αριστερό τμήμα του αγωγού σε διαφορετικές όμως θέσεις για το πάνω και κάτω τμήμα του αγωγού. Αυτό αποτελεί μία πρώτη εμφάνιση θλιβόμενης ζώνης η οποία πιθανότατα θα γινόταν πιο εμφανής για μικρότερες γωνίες.

6.4 Παραμετρική ανάλυση αγωγού πετρελαίου

Η τρίτη διερεύνηση που έγινε, όπως έχει προαναφερθεί, αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς αγωγού που μεταφέρει πετρέλαιο όταν υπόκειται σε διάφορες συνθήκες κατολίσθησης. Στη συνέχεια της ενότητας παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την εν λόγω διερεύνηση και συγκρίνονται τα αντίστοιχα των αγωγών φυσικού αερίου με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, υλικό και συνθήκες καταπόνησης. Το διάγραμμα του Σχήματος 6.21 παρουσιάζει τις μετατοπίσεις τριών αγωγών πετρελαίου οι οποίοι βρίσκονται σε πυθμένα κλίσης (ϕ), η απόκριση των οποίων θα συγκριθεί στη συνέχεια με αγωγούς φυσικού αερίου που βρίσκονται σε αντίστοιχες συνθήκες.

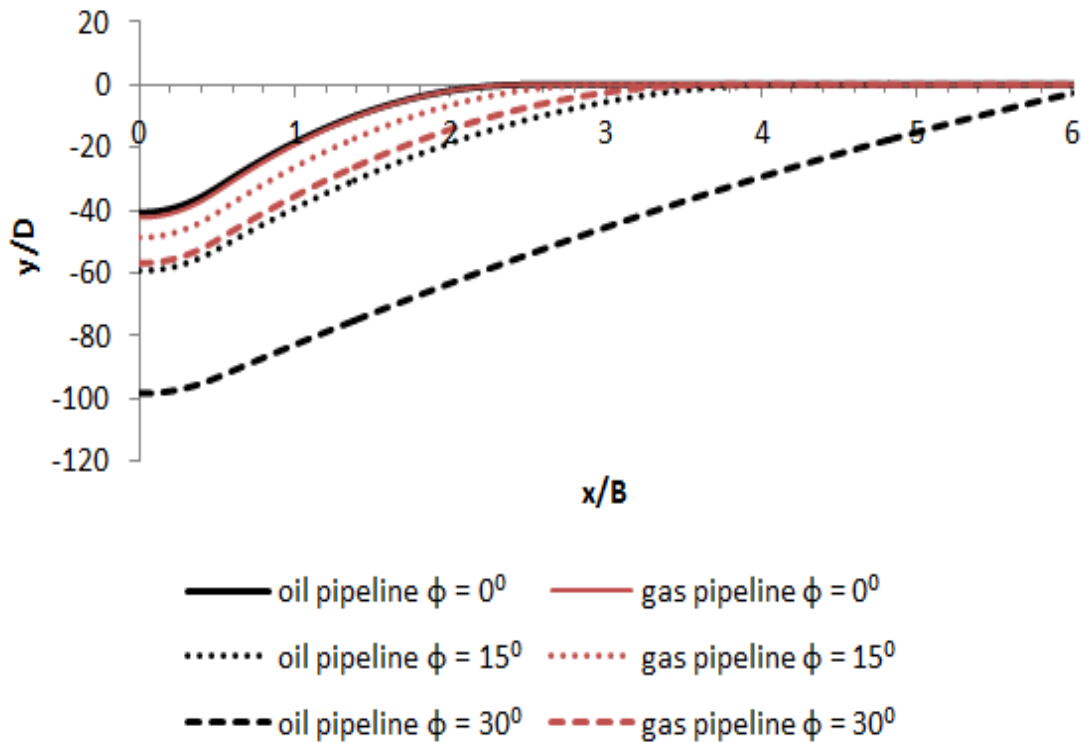
Το διάγραμμα του Σχήματος 6.22 παρουσιάζει τις μετατοπίσεις όλων των αγωγών που συγκρίνονται στη συγκεκριμένη παραμετρική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι κάθετες ως προς τον άξονα των αγωγών μετατοπίσεις σε περιπτώσεις που οι αγωγοί βρίσκονται υπό κλίση (ϕ). Παρατηρείται πως τη μεγαλύτερη μετατόπιση την παρουσιάζει ο αγωγός πετρελαίου όταν είναι τοποθετημένος υπό μεγαλύτερη κλίση ($\phi = 30^\circ$). Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει καθώς ο συγκεκριμένος αγωγός δέχεται μεγαλύτερη δύναμη λόγω του μεγαλύτερου βάρους του εξαιτίας του περιεχομένου του.



Σχήμα 6.21: Σύγκριση αγωγών πετρελαίου για διαφορετικές κλίσεις του πυθμένα.

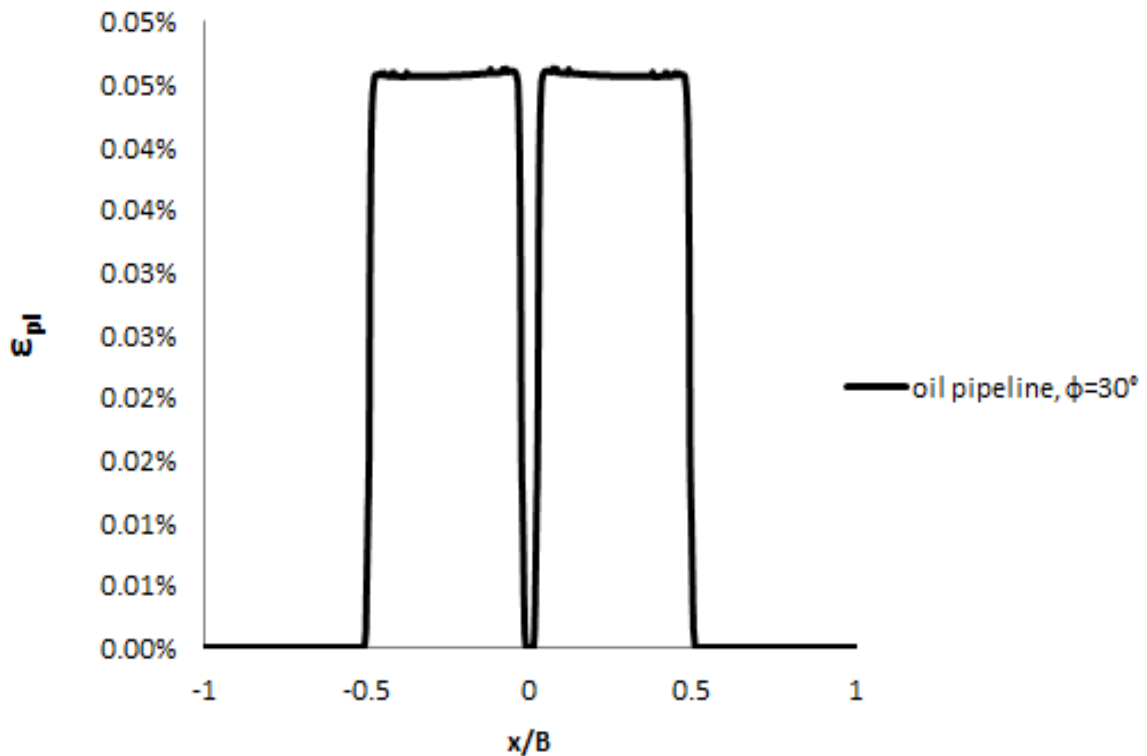
Γενικά, παρατηρείται πως οι αγωγοί που μεταφέρουν πετρέλαιο παρουσιάζουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις από τους αγωγούς φυσικού αερίου, εξαιτίας του βάρους τους, με εξαίρεση όμως τον αγωγό πετρελαίου που βρίσκεται υπό κλίση $\phi = 0^\circ$ ο οποίος παρουσιάζει σχεδόν ίδια μετατόπιση με τον αντίστοιχο αγωγό φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι αγωγοί βρίσκονται σε οριζόντια επιφάνεια έδρασης παρατηρείται πως ο αγωγός πετρελαίου όχι μόνο δεν παρουσιάζει μεγαλύτερη μετατόπιση αλλά παρουσιάζει και ελαφρώς μικρότερη στο τμήμα της κατολίσθησης. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός πως όταν ο αγωγός δεν βρίσκεται υπό κλίση κυριότερο ρόλο από το βάρος του, διαδραματίζει η απόλυτη διαφορά μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής πίεσης $|P_{ex} - P_{in}|$, η οποία είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του αγωγού φυσικού αερίου και σε συνδυασμό με το εξωτερικό φορτίο που ασκεί

η κατολίσθηση μειώνει την ευστάθεια του αγωγού και καθιστά την κατάσταση δυσμενέστερη. Για την γωνία κλίσης $\phi = 15^\circ$ παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερη μετατόπιση του αγωγού πετρελαίου σε σχέση με αυτόν του φυσικού αερίου για τον λόγο που προαναφέρθηκε.



Σχήμα 6.22: Σύγκριση μετατοπίσεων αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου για κεκλιμένο πυθμένα.

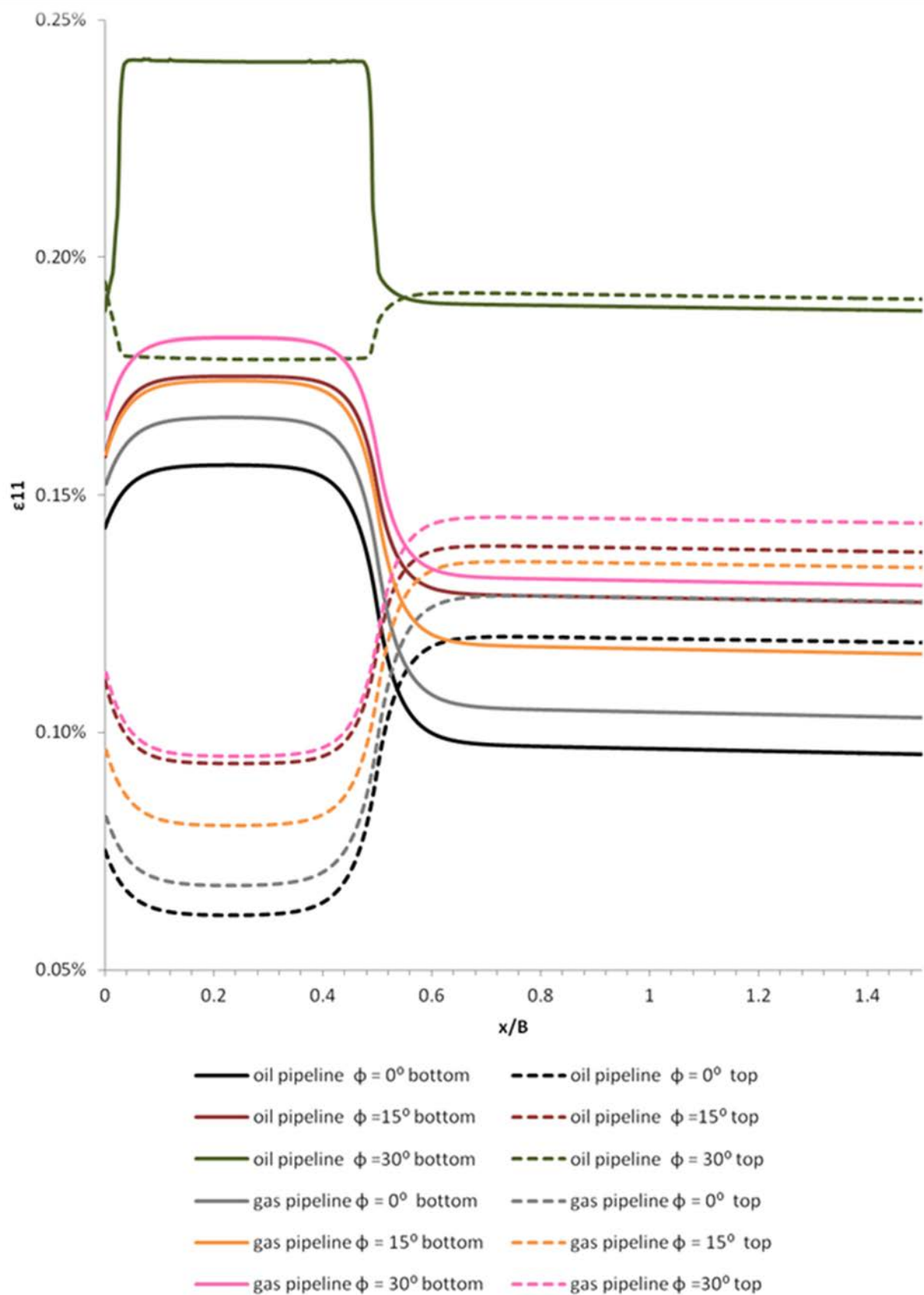
Το διάγραμμα του Σχήματος 6.23 παρουσιάζει τις πλαστικές παραμορφώσεις που παρουσίασε ο αγωγός πετρελαίου σε κλίση πυθμένα $\phi = 30^\circ$. Οι πλαστικές παραμορφώσεις δημιουργήθηκαν στο μέσον του αγωγού λόγω της δυσμενούς κατάστασης που προέκυψε εξαιτίας της μεγάλης γωνίας κλίσης σε συνδυασμό με το βάρος του πετρελαίου. Πιο συγκεκριμένα, ο αγωγός δέχεται μεγάλη εφελκυστική δύναμη στο μέσον του με αποτέλεσμα να παρουσιαστεί πλαστική παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού στις κοντινές περιοχές πριν και μετά το μέσον του. Παρά όλα αυτά, ο αγωγός δεν αστοχεί καθώς όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 6.24 η μέγιστη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης που δέχτηκε ο αγωγός είναι περίπου 0,05% η οποία είναι πολύ μικρή. Για παράδειγμα, το όριο θραύσης του αγωγού είναι 2% για κατάσταση λειτουργικότητας και 4% για την κατάσταση ακεραιότητας (ALA, 2001).



Σχήμα 6.23: Πλαστική παραμόρφωση αγωγού πετρελαίου για κλίση πυθμένα $\phi=30^\circ$.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.23 παρουσιάζονται οι συνολικές παραμορφώσεις των αγωγών πετρελαίου και των αγωγών φυσικού αερίου υπό τις ίδιες κλίσης πυθμένα (ϕ). Από το διάγραμμα αυτό μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις τις παρουσιάζει ο αγωγός πετρελαίου σε κλίση πυθμένα $\phi = 30^\circ$ ο οποίος και πλαστικοποιείται τοπικά και λόγω αυτού παρουσιάζει την τετραγωνική μορφή στο διάγραμμα παραμορφώσεων.
2. Τη μικρότερη ελαστική παραμόρφωση την παρουσιάζει ο αγωγός πετρελαίου σε κλίση πυθμένα $\phi = 0^\circ$.
3. Γενικά, παρατηρείται πως οι κάτω παρειές των αγωγών είναι αυτές που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω εφελκυσμού και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά της καμπύλωσης και παραμορφώνονται περισσότερο.



Σχήμα 6.24: Ελαστικές παραμορφώσεις στις άνω και κάτω παρειές των αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

7.1 Γενικά συμπεράσματα

Η ενέργεια αποτελεί θεμέλιο για τον σύγχρονο ανθρώπινο πολιτισμό καθώς μέσω αυτής εξασφαλίζονται ζωτικής σημασίας λειτουργίες της κοινωνίας όπως οι μεταφορές, οι επικοινωνίες, η λειτουργία της βιομηχανίας, κ.α. Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν μία μορφή ενέργειας η οποία βρίσκεται σε διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση τις τελευταίες δεκαετίες με όλες τις προβλέψεις να εκτιμούν τη συνέχιση αυτής της ανοδικής πορείας για αρκετό ακόμα διάστημα. Ως εκ τούτου, ο τρόπος εξόρυξης τους όσο και ο τρόπος μεταφοράς αυτών των πόρων προκαλεί εξίσου το ενδιαφέρον εταιρειών, χωρών και ερευνητών. Οι αγωγοί, και ακόμα περισσότερο οι υποθαλάσσιοι, έχουν αποδειχθεί ως το ταχύτερο και πιο ασφαλές μέσο μεταφοράς των υδρογονανθράκων, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα της επιλογής της βέλτιστης διαδρομής με τη μικρότερη πιθανότητα ατυχημάτων.

Ωστόσο, η μελέτη γύρω από τους κινδύνους και ειδικά τους γεωκινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσουν οι υποθαλάσσιοι αγωγοί βρίσκεται ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο σε σχέση με την ταχεία εξέλιξη που έχουν οι αγωγοί και ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου η σχετική ελληνική βιβλιογραφία είναι περιορισμένη. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα έχει καταλάβει ήδη μια ισχυρή θέση στην γεωπολιτική ‘σκακιέρα’ των υποθαλασσίων αγωγών με το πρόσφατο έργο του TAP (Trans-Adriatic Pipeline), στο οποίο μπορεί να προστεθούν κι άλλα μεγάλα έργα όπως ο Southmed. Σε συνδυασμό με το έντονα σεισμογενές γεωλογικό της περιβάλλον, καθίσταται έντονη η ανάγκη εμπλουτισμού της ελληνικής βιβλιογραφίας στο επιστημονικό πεδίο των κινδύνων των υποθαλάσσιων αγωγών. Για τον λόγο αυτό η εργασία αυτή μελετάει

έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσουν οι υποθαλάσσιοι αγωγοί, είτε στη Μεσόγειο είτε σε κάποια άλλη περιοχή παγκοσμίως, που για οποιοδήποτε λόγο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης υποθαλάσσιας κατολίσθησης.

Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη υποθαλάσσιων αγωγών που καταπονούνται από πλευρικές εδαφικές μετακινήσεις λόγω (σεισμικής ή μη) κατολίσθησης και είναι μια προσπάθεια διερεύνησης της απόκρισης ενός υποθαλάσσιου αγωγού υπό συνθήκες πλευρικής κατολίσθησης. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκαν αριθμητικά προσομοίωματα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία επαληθεύθηκαν με αντίστοιχες αναλυτικές και αριθμητικές μεθοδολογίες από τη διεθνή βιβλιογραφία. Το γεγονός ότι οι διαφορετικές αριθμητικές και αναλυτικές προσεγγίσεις οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα όσο αφορά την απόκριση του αγωγού είναι πολύ θετικό. Ασφαλώς, η επαλήθευση με δεδομένα από μια πραγματική απόκριση αγωγού ή από πειραματικά αποτελέσματα θα ήταν προφανώς πιο αξιόπιστη, αλλά κάτι τέτοιο δεν κατέστη δυνατό από την ενδελεχή εξέταση της σχετικής βιβλιογραφίας.

Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι τα μέτρα μείωσης της τρωτότητας για την περίπτωση των υποθαλάσσιων αγωγών είναι πιο περιορισμένα από ότι για τους χερσαίους αγωγούς (υπέργειων και υπόγειων) και αυτό αναγκάζει τους μελετητές να είναι πιο συντηρητικοί. Προφανώς, το σημαντικότερο μέτρο μείωσης της τρωτότητας για αυτές τις περιπτώσεις είναι η αποφυγή της επικίνδυνης περιοχής. Αν αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί, τότε υπάρχουν και άλλα μέτρα προστασίας του αγωγού που διασχίζει μια επικίνδυνη περιοχή. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν, στην περίπτωση των χερσαίων αγωγών, την τοποθέτηση του αγωγού σε φρεάτια, τη χρήση επικαλύψεων που μειώνουν την αλληλεπίδραση με το έδαφος και, τέλος, τη χρήση εύκαμπτων αρθρώσεων ή/και αγκυρώσεων. Όλα τα παραπάνω μέτρα αυξάνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής, καθώς χρησιμοποιούν ακριβά υλικά και μηχανισμούς και απαιτούν εξειδικευμένη τεχνική εφαρμογή, όμως, όπως περιγράφεται και στο 2^ο Κεφάλαιο, οι κίνδυνοι από ένα τέτοιο ατύχημα είναι τεράστιοι και αν το επίπεδο επικινδυνότητας που προκύπτει από τις προκαταρκτικές μελέτες του έργου δεν είναι αποδεκτό, τότε θα πρέπει να ληφθούν μέτρα μετριασμού για τη μείωση του κινδύνου.

7.2 Συμπεράσματα από την Αριθμητική Διερεύνηση

Το κύριο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τη μελέτη της συμπεριφοράς υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων οι οποίοι καταπονούνται από την αλληλεπίδραση τους με το έδαφος εξαιτίας κατολίσθησεως εγκάρσια στον άξονα τους. Η προσομοίωση των αγωγών και της αλληλεπίδρασης τους με το έδαφος γίνεται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού ABAQUS, όπως αναλυτικά αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5.

Η υπολογιστική διερεύνηση χωρίζεται σε τρία μέρη. Η πρώτη παραμετρική διερεύνηση αφορά έναν ευθύγραμμο αγωγό φυσικού αερίου για εγκάρσια κατολίσθηση κάθετα στον άξονα του. Η εξωτερική πίεση που δέχεται ο αγωγός (P_{ex}) και οι ιδιότητες του εδάφους παραμένουν σταθερές, ενώ οι παράμετροι που εξετάζονται είναι το φορτίο της κατολίσθησης (q), το πλάτος της κατολίσθησης (B), η κλίση του εδάφους (ϕ), ο λόγος διαμέτρου προς το πάχος της διατομής του αγωγού (D/t), το υλικό του αγωγού και η εσωτερική του πίεση (P_{in}). Όλα τα παραπάνω εξετάζονται για αγωγό μήκους 3000 km σε βάθος θάλασσας περίπου 200m. Το φορτίο της κατολίσθησης όπως αναμένεται, επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του αγωγού. Τα φορτία (q) που εξετάστηκαν είναι 5, 10 και 25 kN/m και από τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο 6^ο Κεφάλαιο προκύπτει πως μεγαλύτερα φορτία προκαλούν, όπως ήταν αναμενόμενο, δυσμενέστερες καταστάσεις για αγωγό. Μεγαλύτερα φορτία προκαλούν μεγαλύτερες μετακινήσεις και παραμορφώσεις στον αγωγό.

Ομοίως, το πλάτος της κατολίσθησης (B) εξετάζεται για τρεις διαφορετικές τιμές: 60, 120 και 240 m. Προκύπτει πως μικρότερα πλάτη κατολίσθησης δημιουργούν δυσμενέστερες συνθήκες για τον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα, για πλάτη (B) 120m και 60m παρουσιάζονται θλιπτικές παραμορφώσεις στον αγωγό και ιδιαίτερα για πλάτος $B = 60m$ δημιουργεί την πιο κρίσιμη κατάσταση από όλες τις άλλες τιμές πλάτους (B) που εξετάστηκαν, καθώς προκαλούνται τοπικά φαινόμενα λυγισμού. Η κλίση του εδάφους αποδείχθηκε ότι παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του αγωγού όταν του ασκείται η επιρροή μιας κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερες γωνίες κλίσεως του πυθμένα δημιουργούν δυσμενέστερες καταστάσεις για τον αγωγό, καθώς πέρα από το φορτίο της κατολίσθησης, ο αγωγός επηρεάζεται πλέον και από το δικό του βάρος και όσο αυξάνεται η κλίση τόσο αυξάνεται και η επίδραση του. Μεγαλύτερες γωνίες κλίσεως οδηγούν σε μεγαλύτερες μετακινήσεις του αγωγού.

Η επιλογή της διατομής του αγωγού προφανώς επηρεάζει και το κόστος, αφού όσο μεγαλύτερα είναι η διάμετρος και το πάχος του αγωγού τόσο αυξάνεται και το κόστος κατασκευής. Στο Κεφάλαιο 6 διερευνήθηκε η συμπεριφορά του αγωγού για μία σταθερή διάμετρο (D) και τρία διαφορετικά πάχη τοιχώματος (t). Το αποτέλεσμα των αναλύσεων ήταν ότι η χρήση μεγαλύτερου πάχους, δηλαδή μικρότερου λόγου D/t είναι ευεργετική για τον αγωγό, καθώς οδηγεί σε μικρότερες πλευρικές μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Η μορφή της πλευρικής μετακίνησης του αγωγού ήταν ίδια και στις τρεις περιπτώσεις.

Η επιλογή της ποιότητας του υλικού του αγωγού επηρεάζει επίσης και το κόστος κατασκευής. Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκε η συμπεριφορά του αγωγού για χάλυβα X56, X60 και X65. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο 6^ο Κεφάλαιο οδηγούν στο συμπέρασμα πως ο αγωγός παρουσίασε την ίδια συμπεριφορά και για τα τρία διαφορετικά υλικά. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι γενικά ο αγωγός είχε μικρές παραμορφώσεις (ελαστική απόκριση) και τα υλικά έχουν το ίδιο μέτρο ελαστικότητας (βλ. Πίνακα 5.2). Όσον αφορά στην εσωτερική πίεση, η αύξηση της οδηγεί σε μεγαλύτερες πλευρικές μετατοπίσεις και σε μεγαλύτερες εφελκυστικές παραμορφώσεις του αγωγού.

Συνοπτικά, όσον αφορά την πλευρική μετατόπιση του αγωγού, από την παραμετρική μελέτη προέκυψε ότι μεγαλύτερες τιμές δύναμης κατολίσθησης, πλάτους κατολίσθησης, εσωτερικής πίεσης και γωνίας κλίσης οδηγούν σε μεγαλύτερη μετατόπιση. Επίσης, ο αγωγός με λεπτότερο τοίχωμα παρουσιάζει μεγαλύτερη μετατόπιση. Όσον αφορά το τμήμα του αγωγού που κινείται πλαγίως, η παραμετρική μελέτη δείχνει ότι μεγαλύτερη επιβαλλόμενη δύναμη, μεγαλύτερο πλάτος κατολίσθησης και πιο απότομη γωνία κλίσης έχουν ως αποτέλεσμα την πλευρική μετακίνηση μεγαλύτερου τμήματος του αγωγού.

Το δεύτερο μέρος της αριθμητικής διερεύνησης αφορά στη μελέτη της συμπεριφοράς αγωγού φυσικού αερίου για κατολίσθηση υπό γωνία (θ) ως προς τον άξονα του. Σε αυτήν την περίπτωση όλες οι παράμετροι που αναφέρθηκαν προηγουμένως έχουν μια σταθερή τιμή και ο αγωγός εξετάζεται για πέντε διαφορετικές γωνίες κατολίσθησης (θ). Πιο συγκεκριμένα, οι γωνίες που εξετάστηκαν είναι 0, 30,45, 60 και 90°. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης, τα οποία παρουσιάζονται στο 6^ο κεφάλαιο, δείχνουν πως όσο μεγαλώνει η γωνία επιβολής της κατολίσθησης ο αγωγός επηρεάζεται πιο έντονα από την κατολίσθηση και κατά συνέπεια παρουσιάζει μεγαλύτερες πλευρικές μετατοπίσεις και παραμορφώσεις.

Επίσης, κρίνεται αναγκαίο να γίνει λόγος για τις ασυμμετρίες που προκαλεί η συγκεκριμένη μορφή κατολίσθησης στην ελαστική παραμόρφωση του αγωγού. Πιο

συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως όσο μικραίνει η γωνία κατολίσθησης η ασυμμετρία των παραμορφώσεων γίνεται όλο και πιο έντονη στον αγωγό.

Εξίσου σημαντική παρατήρηση που προέκυψε από τη συγκεκριμένη διερεύνηση είναι η δημιουργία θλιπτικών παραμορφώσεων στον αγωγό όταν αυτός υπόκειται σε γωνία κατολίσθησης $\theta = 30^\circ$. Οπότε, πρέπει να υπογραμμιστεί το γεγονός πως η γωνία κλίσης $\theta = 30^\circ$ αποτελεί κρίσιμη γωνία καθώς σε αυτήν εμφανίζεται θλίψη τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω τμήμα του αγωγού. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία θλιβόμενης ζώνης, η οποία αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμη κατάσταση, λόγω της μικρότερης αντοχής του αγωγού σε θλίψη εξαιτίας του φαινομένου του τοπικού λυγισμού και καλό είναι να αποφεύγεται. Συνεπώς, γωνίες διασταύρωσης του αγωγού με τη ζώνη κατολίσθησης μικρότερες των 30° καλό είναι να αποφεύγονται.

Το τρίτο μέρος της διερεύνησης αφορά στη μελέτη της απόκρισης αγωγού πετρελαίου για εγκάρσια κατολίσθηση κάθετη στον άξονα του. Σε αυτήν την περίπτωση ο αγωγός έχει τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με τον αγωγό φυσικού αερίου που εξετάστηκε προηγουμένως, ώστε να μπορεί να γίνει μεταξύ τους σύγκριση και οι παράμετροι ως προς τις οποίες μελετάται ο αγωγός είναι οι διαφορετικές γωνίες κλίσης του πυθμένα (ϕ). Από τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Ο αγωγός πετρελαίου σε συνθήκες μηδενικής κλίσης θα μπορούσε να θεωρηθεί πιο σταθερός και πιο ανθεκτικός όσον αφορά την καταπόνηση του σε κατολίσθηση από τον αγωγό φυσικού αερίου. Όμως σε περίπτωση τοποθέτησης σε κεκλιμένο πυθμένα αντιμετωπίζει σημαντικότερα προβλήματα από τον αγωγό φυσικού αερίου, εξαιτίας του βάρους του πετρελαίου με αποτέλεσμα την δημιουργία δυσμενέστερων καταστάσεων για τον αγωγό.

Αντιθέτως, ο αγωγός φυσικού αερίου μπορεί να είναι πιο ελαφρύς και άρα πιο ευάλωτος όταν βρίσκεται σε οριζόντια θέση, όταν όμως βρίσκεται υπό κλίση οι πιθανότητες αστοχίας του ή ακόμα και πλαστικοποίησης του είναι μικρότερες καθώς το περιεχόμενο του είναι σχεδόν αβαρές με αποτέλεσμα ακόμα και η αύξηση του βάρους του λόγω της κλίσης να μην είναι τόσο επικίνδυνη για τον αγωγό. Με άλλα λόγια, όταν ο αγωγός δεν βρίσκεται υπό κλίση κυριότερο ρόλο από το βάρος του, διαδραματίζει η απόλυτη διαφορά της εξωτερικής με την εσωτερική πίεση $|P_{ex}-P_{in}|$ η οποία είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του φυσικού αερίου και σε συνδυασμό με το εξωτερικό φορτίο που ασκεί η κατολίσθηση καθιστά την κατάσταση δυσμενέστερη για τον αγωγό.

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Όπως είναι φυσικό, η διερεύνηση της απόκρισης μεταλλικών αγωγών υδρογονανθράκων για εδαφική μετακίνηση κάθετα στον άξονα τους δεν θα μπορούσε να διερευνηθεί πλήρως στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας. Για αυτόν τον λόγο, κρίνεται αναγκαίο να διατυπωθούν κάποιες προτάσεις για την περαιτέρω εξέταση του θέματος.

Αρχικά, όσον αφορά την πρώτη διερεύνηση της εργασίας, μια μελλοντική σχετική έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει και άλλες παραμέτρους όπως οι συνθήκες του πυθμένα. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να διερευνηθεί η χρήση αποτελεσματικών μέτρων προστασίας για τα χειρότερα σενάρια διακινδύνευσης. Όσον αφορά τη δεύτερη παραμετρική μελέτη αυτής της εργασίας, θα μπορούσε να επεκταθεί και να εξεταστούν περισσότερες γωνίες, ειδικά για γωνίες κοντά στις 30° που οδήγησε σε θλιπτικές παραμορφώσεις με σκοπό τη μελέτη της δημιουργίας θλιβόμενης ζώνης. Στη συνέχεια, να εξεταστεί ένας αγωγός στον οποίο θα έχουν ληφθεί κάποια μέτρα προστασίας, και να γίνει σύγκριση μεταξύ τους. Για την τρίτη παραμετρική ανάλυση, κρίνεται ενδιαφέρον να εξετασθεί ένας αγωγός πετρελαίου με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, για παράδειγμα τα αληθινά χαρακτηριστικά κάποιου υπαρκτού υποθαλάσσιου αγωγού πετρελαίου, και στη συνέχεια να εξεταστεί για τις ίδιες συνθήκες κατολίσθησης αρχικά χωρίς και στη συνέχεια με εφαρμογή μέτρων προστασίας. Σε όλες τις κρίσιμες περιπτώσεις, θα πρέπει να γίνει επίλυση των αριθμητικών προσομοιωμάτων με θεώρηση μη-γραμμικής συμπεριφοράς. Ακόμα, θα μπορούσαν να εξεταστούν διαφορετικές συνοριακές συνθήκες αντί για πακτώσεις στα άκρα του αγωγού, διευρύνοντας το μήκος του ελεύθερου τμήματος πέρα από τη ζώνη κατολίσθησης.

Επίσης, υπάρχουν αρκετά περιθώρια για τη βελτίωση της ακρίβειας προσομοίωσης των εξεταζόμενων προβλημάτων με προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων τριών διαστάσεων με διακριτοποίηση του αγωγού με στοιχεία τύπου κελύφους (shell elements). Επίσης, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και άλλες αριθμητικές μεθοδολογίες, όπως για παράδειγμα η μέθοδος διακριτών στοιχείων (Discrete Element Method-DEM), η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη αγωγών υποκείμενων σε κατολίσθηση και ειδικά για την αλληλεπίδραση μεταξύ του αγωγού και του εδάφους με κατάλληλα συζευγμένα και ασύζευκτα «μακρομοντέλα». Επιπροσθέτως, πολύ χρήσιμα συμπεράσματα θα μπορούσαν να εξαχθούν κι από κατάλληλα διαμορφωμένα πειράματα για την περαιτέρω εξέταση της -όσο γίνεται πιο ρεαλιστικής- προσομοίωσης της απόκρισης υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων υποκείμενων σε κατολισθήσεις.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γρομπανόπουλος, Σ. (2013). *Το LNG ως ευρωπαϊκή στρατηγική επένδυση*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Διεθνών και Ευρωπαϊκών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.
- Ζέρβου, Α. (2008). *Σεισμική συμπεριφορά αγωγού εκβολής*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Καραπάνος, Χ. (2000). *Τεχνολογία φυσικού αερίου*. Περιστέρι, Εκδόσεις Ίων.
- Λουκογεωργάκη, Ε. (2014). *Υποθαλάσσιοι Αγωγοί: Προσδιορισμός υδροδυναμικών φορτίσεων και υδροδυναμικής ανάλυσης*. Διδακτικές Σημειώσεις, Μαθήματος Θαλασσίων Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Σαραντοπούλου, Κ. (2013). *Ανάλυση του εθνικού συστήματος μεταφοράς φυσικού αερίου*, Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ενεργείας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Σώκος, Ε. *Σεισμοί – Καταγραφή σεισμικότητας στον Ελλαδικό χώρο- Αντιμετώπιση*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Χαραλαμπίδης, Γ. (2002). *Κοιτασματολογία για μηχανικούς*. ΤΕΙ Κοζάνης, Κοζάνη.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- ABAQUS (2011). *Abaqus 6.14 – Users’ Manual*, Simulia, Providence, RI, USA.
- American Lifelines Alliance – ALA (2001). A. S. (2001). *Guidelines for the Design of Buried Pipe*. Federal Emergency Management Agency (FEMA).

- Bamford C., and Robinson H., (1978). *Geography of Transport*. Plymouth: MacDonald and Evans.
- Degg, M. (1989). *Earthquake Hazard Assessment after Mexico*. Disasters. 13(3), 237-46.
- DNV-RP-F105, R. P. (2006). *Free Spanning Pipelines*. Det Norske Veritas.
- DNV-RP-F107, R. P. (2010). *Risk Assessment of Pipeline Protection*. Det Norske Veritas.
- DNV-RP-F109, R. P. (2010). *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Det Norske Veritas
- Guo B., Song S., Chacko J., and Ghalambor A. (2005), *Offshore Pipelines*. Elsevier, Gulf Professional Publishing, Burlington.
- Hamada, M. (2003). *Measures and designs of lifelines against fault-induced ground surface ruptures*, Seismic Fault Induced Failures, (K. H. (Konagai, Ed.) Workshop, JSCE.
- Hopkins, P. (2008). *Learning from Pipeline Failures*. WTIA/APIA Welded Pipeline Symposium, Perth, Australia.
- Kirk, R. (2004). *Encyclopedia of Chemical Technology* vol.23. Fourth Edition, Wiley.
- Kyriakides S., and Corona E. (2007). *Mechanics of offshore pipelines vol 1: Buckling and Collapse*. Elsevier.
- Lawal, M. (2010). *Historical development of the pipelines as a mode of transportation*. Department of Geography and Planning, Faculty of Social Sciences, Lagos State University, Lagos, Nigeria.
- Liu X., and O'Rourke M. (1997). *Behavior of Continuous Pipeline Subject to Transverse PGD*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Beijing.
- Liu, J. (2015). *Impact forces of submarine landslides on offshore pipelines*. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, China.

- Manshoori, M. R. (2002). *Evaluation of Seismic Vulnerability and Failure Modes*. Deputy of Engineering and Domestic Manufacturing, Iran Ministry of Petroleum, Iran.
- Mc Caffrey M.A. and O'Rourke T.D. (1983). *Buried Pipeline Response to Reverse Faulting during the 1971 San Fernando Earthquake*. Earthquake Behavior and Society of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- Nortcliff, S. (1992). *Geohazards*. Springer, Netherlands.
- Parker E.J., Traverso C., Moore, R., Evans T., Usher N. (2014). *Landslide impact on submarine pipelines: Analytical and numerical analysis*. Journal of Engineering Mechanics, 141(2), 28-37.
- TAP, (Trans-Adriatic Pipeline), (2013). *Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) Albania: Section 4 – Project Description*. Tirana, Albania.
- Ting, E.C. (2004). *Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part I. Basic procedure and a plane frame element*. Journal of Engineering Mechanics, 20(2), 113-122.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.
- Yuan F., Li L., Guo Z. and Wang L. (2014). *Landslide impact on submarine pipelines: Analytical and numerical analysis*, Journal of Engineering Mechanics, 141(2), 28-37.
- Zakeri, A. (2007). *A literature review on debris flow impact on structures*. ICG report 2007-6-1, International Centre for Geohazards, Oslo, Norway.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

www.worldmap.harvard.edu.

www.allrussias.com.

www.gusgas.gr

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF#.CE.95.CE.BE.CE.B1.CE.B3.CF.89.CE.B3.CE.AE_.CE.BA.CE.B1.CE.B9_.CE.BC.CE.B5.CF.84.CE.B1.CF.86.CE.BF.CF.81.CE.AC

www.kaloudis-gas.gr/Fusiko-Aerio/Genikes-Plirofories

www.petrotech.teikav.edu.gr/index.php/features.html

www.epathessaloniki.gr/to-fysiko-aerio-sthn-ellada/

www.oryktosploutos.net

www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/hydrates_what.cfm

www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise-A-Z/Offshore-geohazards

